

# **UNIVERSIDAD DE CUENCA**



**Facultad de ingeniería**

**Carrera de ingeniería civil**

## **Simulación numérica experimental de un canal con un nuevo modelo de rugosidad artificial**

Trabajo de titulación previo a la obtención

del título de Ingeniero Civil

**Directora:**

Ing. Verónica Margarita Carrillo Serrano. MSc.

CI: 0104040480

**Autor:**

Pablo Nicolás Merchán Domínguez

CI: 0105534044

Cuenca – Ecuador

2019



## Resumen:

Para canales alojados en tierra, revestidos en piedra o de hormigón, se deben considerar las velocidades máximas a las que puede circular un fluido, debido a que velocidades muy altas del agua pueden provocar erosión en el canal, arrastres de material del lecho, lavado de finos; de esta manera el canal pierde su vida útil muy rápidamente y se deben realizar mantenimientos muy seguidos lo cual encarece la obra.

Se han propuesto en la actualidad el uso de rugosidad artificial en canales de alta pendiente para el control de la velocidad, y de esta manera proteger los canales de eventos que puedan deteriorarlos. Para el análisis de estos elementos se utilizan programas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) los cuales resuelven las ecuaciones de gobierno de flujo de Navier – Stokes de forma iterativa, de esta manera, haciendo más sencillo el análisis de lo que puede ocurrir en las obras hidráulicas antes de su construcción. Debido al incremento de la capacidad computacional usar esta metodología se ha vuelto algo sencillo para muchos casos de estudio.

En el presente trabajo de titulación se utiliza como base el canal ubicado en el Laboratorio de Hidráulica y Mecánica de Fluidos de la Universidad de Cuenca, para realizar una simulación numérica ubicando un modelo de rugosidad artificial dentro del canal utilizando la herramienta computacional de análisis OpenFoam y la herramienta de post procesamiento Paraview. Se realiza una simulación inicial de calibración para replicar en el modelo computacional todas las variables que se miden en el laboratorio, se determina el coeficiente de rugosidad absoluta para el canal.

Finalmente se realiza tres simulaciones, cada una con un modelo de rugosidad artificial diferente, luego se compara la efectividad de cada una entre sí y con respecto al modelo teórico. Se determina el modelo de rugosidad artificial que mejor disipa la energía o que reduce más la velocidad del agua, utilizando mediciones de velocidad y régimen de flujo.

**Palabras Clave:** Canal. Caudal. CFD. Rugosidad artificial. Simulación numérica. Velocidad.



## **Abstract:**

For channels housed in earth, covered in stone or concrete, the maximum speeds at which a fluid can circulate must be considered, because very high velocities of the water can cause erosion in the channel, dragging of material from the bed, washing of fine in this way, the channel loses its useful life very quickly and maintenance must be carried out very often, which makes the work more expensive.

The use of artificial roughness in high slope channels has now been proposed for speed control, and in this way protect the channels from events that may deteriorate them. For the analysis of these elements Computational Fluid Dynamics (CFD) programs are used, which solve the Navier - Stokes flow governance equations iteratively, in this way, making it easier to analyze what can happen in the waterworks before its construction. Due to the increase in computational capacity, using this methodology has become simple for many case studies.

In the present thesis work, the channel located in the Hydraulic and Fluid Mechanics Laboratory of the University of Cuenca is used as a base, to perform a numerical simulation by locating an artificial roughness model within the channel using the OpenFoam computational analysis tool and the post-processing tool Paraview. An initial calibration simulation is performed to replicate in the computational model all the variables that are measured in the laboratory, the absolute roughness coefficient for the channel is determined.

Finally, three simulations are carried out, each with a different artificial roughness model, and then the effectiveness of each one is compared with the theoretical model. The artificial roughness model that best dissipates the energy or that further reduces the water velocity, using velocity and flow rate measurements, is determined.

**Key words:** Artificial roughness. Channel. CFD. Flow. Numerical simulation. Speed.



## Tabla de contenido

Resumen:	1
Abstract:	2
Tabla de contenido	3
Índice de Ilustraciones:	4
Índice de Tablas	6
1. Introducción	11
2. Metodología:	13
2.1. Rugosidad Artificial.	13
2.2. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).	15
2.3. Diseño de los bloques de rugosidad artificial.	18
2.4. Rugosidad Artificial Modificada.	22
3. Simulación Numérica.	25
3.1. Construcción de la Malla.	25
3.2. Validación del modelo:	28
3.3. Selección del esquema solucionador para el modelo creado.	28
3.4. Modelo de turbulencia k-omega.	28
3.5. Método de Volumen de Fluido	29
3.6. Parámetros para la simulación.	29
4. Resultados.	30
4.1. Estabilización del flujo en el canal.	30
4.2. Estabilización del flujo para los canales con Rugosidad Artificial.	32
4.3. Velocidad a lo largo del canal con rugosidad artificial.	41
4.4. Vectores de Velocidad.	46
5. Conclusiones y Recomendaciones	52
6. Referencias Bibliográficas.	54
Anexo 1	56
Pruebas de Calibración y configuración del modelo numérico para la simulación.	56
Exportar la malla a un formato compatible con openFoam desde Salome-Meca.	56
APENDICE A	64
APENDICE B	69
APENDICE C	74



## Índice de Ilustraciones:

Ilustración 1 Canal abierto del laboratorio de Hidráulica .....	17
Ilustración 2 Modelo de rugosidad Tipo C “Barrotes Cortados” .....	19
Ilustración 3: Bloques de rugosidad tipo C – Dimensiones en [mm]. La flecha indica la dirección del flujo. ....	21
Ilustración 4: Rugosidad artificial modificada 1 (RAM 1) – Dimensiones en [mm]. La flecha indica la dirección del flujo.....	23
Ilustración 5: Rugosidad artificial modificada 2 (RAM 2) – Dimensiones en [mm]. La flecha indica la dirección del flujo.....	24
Ilustración 6 Detalle del Mallado del canal – Bloques de rugosidad Tipo C.....	26
Ilustración 7 Detalle del Mallado del canal. ....	26
Ilustración 8: Gráfica de velocidad vs tiempo se simulación para un punto al inicio del canal. .	30
Ilustración 9: Gráfica de velocidad vs tiempo se simulación para un punto en el centro del canal.....	31
Ilustración 10: Gráfica de velocidad vs tiempo se simulación para un punto al final del canal. .	31
Ilustración 11: Estabilización de Flujo para un punto al inicio (a), centro (b) y fina (c) del canal para el modelo de rugosidad Tipo C. 1ra prueba. ....	33
Ilustración 12: Estabilización de Flujo para un punto al inicio (a), centro (b) y final (c) del canal para el modelo de rugosidad Tipo C. 2da prueba.....	35
Ilustración 13: Estabilización de flujo para un punto al inicio (a), centro (b) y final (c) del canal para el modelo RAM 1. 1ra prueba.....	36
Ilustración 14: Estabilización de flujo para un punto al inicio (a), centro (b) y final (c) del canal para el modelo RAM 1. 2da prueba. ....	38
Ilustración 15: Estabilización de flujo para un punto al inicio (a), centro (b) y final (c) del canal para el modelo RAM 2. 1ra prueba.....	39
<i>Ilustración 16: Estabilización de flujo para un punto al inicio (a), centro (b) y final (c) del canal para el modelo RAM 2. 2da prueba. ....</i>	<i>41</i>
Ilustración 17: Velocidad al final del canal con rugosidad Tipo C. Para el caudal máximo de 26L/s.....	42
Ilustración 18: Velocidad al final de canal con RAM 1. Para el caudal máximo de 26L/s. ....	42
Ilustración 19: Velocidad al final del canal con RAM 2. Para el caudal máximo de 26L/s. ....	43
Ilustración 20: Velocidad para simulación con Rugosidad Tipo C, para un caudal 20 L/s.....	44
Ilustración 21: Velocidad para simulación con RAM 1, para un caudal 20 L/s. ....	45
Ilustración 22: Velocidad media para simulación con RAM 2, para un caudal 20 L/s.....	45
Ilustración 23: Vectores de velocidad para el modelo de rugosidad Tipo C. Al fondo (a), a la altura de los bloques (b), a la mitad de la altura de flujo (c), y en la superficie (d).....	47
Ilustración 24: Vectores de velocidad para el modelo de rugosidad RAM1. Al fondo (a), a la altura de los bloques (b), a la mitad de la altura de flujo (c), y en la superficie (d).....	49
Ilustración 25: Vectores de velocidad para el modelo de rugosidad RAM2. Al fondo (a), a la altura de los bloques (b), a la mitad de la altura de flujo (c), y en la superficie (d).....	51
Ilustración 1A <i>Ventana del Terminal en donde se ingresa el comando para acceder al cluster de la Universidad de Cuenca. ....</i>	<i>64</i>
Ilustración 2A Ingreso de la contraseña .....	64
Ilustración 3A <i>Indicador de que se ha ingresado al cluster exitosamente. ....</i>	<i>64</i>
Ilustración 4A Se accede al lugar de origen del programa y se ejecuta el comando indicado....	65



Ilustración 5A Comando utilizado para cargar los datos al cluster.....	65
Ilustración 6A Versiones de mobaXterm para descargar desde la página oficial.....	66
Ilustración 7A Icono del programa MobaXterm. ....	66
Ilustración 8A Se elige el tipo de sesión SSH. ....	66
Ilustración 9A Se ingresan los datos de la dirección IP y del nombre de usuario, luego se da clic en OK.....	67
Ilustración 10A. A continuación se abre esta ventana en donde se pedirá primero el ingreso de la contraseña, y luego se podrá proceder a realizar todas las tareas para la simulación. ....	67
Ilustración 1B Archivo decomposeParDict (adaptado del manual de usuario de OpenFoam) .....	69
Ilustración 2B Geometría dividida en diferentes procesadores. ....	71
Ilustración 3B Visualización del proceso mediante el comando top. ....	72
Ilustración 4B Visualización de los nodos del cluster.....	73
Ilustración 1C Página para descargar el programa Salome-Meca. ....	74
Ilustración 2C Interfaz del programa al iniciar.....	75
Ilustración 3C Ingreso de las coordenadas para los puntos. ....	75
Ilustración 4C Todos los puntos ingresados. ....	76
Ilustración 5C Ventana que muestra los elementos de la geometría creados hasta el momentos, y como ocultarlos de la pantalla. ....	76
Ilustración 6C Ventana para crear perfiles de la geometría.....	77
Ilustración 7C Curvas principales de la geometría.....	78
Ilustración 8C Ventana para crear superficies a partir de curvas. ....	78
Ilustración 9C Superficie 1 creada (Face_1) .....	79
<i>Ilustración 10C Todas las superficies que encierran la geometría ya creadas. ....</i>	<i>79</i>
Ilustración 11C Ventana para construir el Shell.....	80
Ilustración 12C Ventana para crear el sólido.....	80
Ilustración 13C Ventana para crear grupos a partir del sólido. ....	81
Ilustración 14C Creación del grupo inlet1. ....	82
Ilustración 15C Grupo concretewall creado y mostrado en la pantalla. ....	83
Ilustración 16C Ventana para crear una malla a partir de un sólido. ....	83
Ilustración 17C Especificaciones del tamaño de las celdas para la malla .....	84
Ilustración 18C Ventana para crear grupos para el mallado a partir de los grupos del sólido...	85
Ilustración 19C Grupos creados en la malla a partir de los grupos del sólido.....	86
Ilustración 20C Grupo inlet1 y concretewall mostrados en pantalla. ....	86
Ilustración 21C Exportar la malla a un formato compatible con openFoam.....	87



## Índice de Tablas

<i>Tabla 1: Datos de los ensayos en el canal del laboratorio.</i>	18
Tabla 2: Datos iniciales para el canal.	18
Tabla 3: Dimensiones de bloques de rugosidad. $Q = 26 \text{ L/s}$ .	20
Tabla 4: Datos iniciales para un caudal de $20 \text{ L/s}$ .	22
Tabla 5: Dimensiones de bloques de rugosidad. $Q = 20 \text{ L/s}$ .	22
Tabla 6 Calidad de la malla	27
Tabla 7 Velocidad de Simulación vs Velocidad Teórica. Caudal de $26 \text{ L/s}$ .	43
Tabla 8 Velocidad de Simulación vs Velocidad Teórica. Caudal de $20 \text{ L/s}$ .	44

Tabla 1. 1: Plan de pruebas para calibración.	56
Tabla 1. 2: alpha.water.orig	58
Tabla 1. 3: U	58
Tabla 1. 4: p_rgh	59
Tabla 1. 5: nut	59
Tabla 1. 6: k	60
Tabla 1. 7: omega	61
Tabla 1. 8: g	61
Tabla 1. 9: transportProperties	61
Tabla 1. 10: turbulentProperties	62
Tabla 1. 11: controlDict	62
Tabla 1. 12: setFieldsDict	63



### Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Yo, Pablo Nicolás Merchán Domínguez, autor/a del trabajo de titulación "Simulación numérica experimental de un canal con un nuevo modelo de rugosidad artificial", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 26 de Febrero del 2019

Una firma manuscrita en tinta azul, que parece ser "P. Merchán", sobre una línea horizontal.

Pablo Nicolás Merchán Domínguez

C.I: 0105534044





### Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Yo, Pablo Nicolás Merchán Domínguez en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Simulación numérica experimental de un canal con un nuevo modelo de rugosidad artificial", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 26 de Febrero del 2019

Pablo Nicolás Merchán Domínguez

C.I: 0105534044



## **Dedicatoria:**

A mis hermanas Martina y Cristina, por toda la fuerza y alegría que representan en mi vida.

A la memoria de mis abuelos, Humberto y Alfonso, que fueron un ejemplo a seguir para mí.

A mis abuelas Ana Lucía y Marta, por todo su cariño, su preocupación y sus oraciones.



## **Agradecimiento:**

A mi Madre por apoyarme a lo largo de todos estos años de estudio, por sus consejos que me ayudaron a seguir siempre el camino correcto y por su cariño que me dio fuerzas para continuar en los momentos difíciles.

A mi Padre por estar presente, por su preocupación, sus ideas y ocurrencias, que han abierto mi mente durante este periodo de estudios hacia nuevas formas de pensamiento.

A mi directora de trabajo, por toda su ayuda y paciencia, sin las cuales este proyecto no habría salido adelante.

A mis maestros, por haberme dado las bases para ser un excelente profesional.

A mi familia, por siempre estar pendientes, porque a pesar de la distancia, me brindan su cariño y apoyo incondicional.

Y a mis amigos que han ayudado a poner en marcha este proyecto.



## 1. Introducción

Las obras hidráulicas siempre han sido de gran importancia en la historia de desarrollo de la humanidad pues transportan el líquido vital ya sea para consumo, riego, generación de energía; por el crecimiento de la población mundial se ha visto necesario mejorar la tecnología y metodologías de diseño que permita la optimización en la utilización del recurso hídrico, por lo tanto es importante considerar los fenómenos que pueden ocurrir durante el tiempo de utilización de las obras. Un componente de consideración importante son los canales de gran pendiente, que generan en muchos de los casos velocidades que resultan perjudiciales para la estabilidad de los mismos.

Para el diseño óptimo de canales abiertos, específicamente aquellos alojados en tierra, y revestidos con piedra y hormigón, debe considerarse las velocidades mínimas que no produzcan sedimentación de materiales y máximas con el fin de evitar la erosión en la base del lecho; suelen considerarse velocidades de flujo del orden de 0,9 a 1 m/s para canales arcillosos y con roca y mezcla simple, y de 3 a 5 m/s para canales revestidos con concreto, [Rojas, 2013]. En obras especiales, como canales de gran pendiente, entre los principales, las velocidades suelen alcanzar valores considerablemente mayores a los valores establecidos como límite, esto ocasiona arrastre de materiales, socavación en las paredes y erosión en el lecho del canal, lavado de material fino en las paredes y fondo, deformaciones en la sección de la estructura y finalmente, si no se realizan obras de mantenimiento, el colapso de las obras hidráulicas. Todos estos problemas hacen necesaria la implementación de soluciones adicionales que permitan reducir los valores de velocidad a unos que se encuentren dentro de los límites mencionados. La construcción de rápidas en escalera constituye una solución que puede resultar muy costosa, por tanto una de las metodologías más utilizadas para la reducción de velocidad en canales es la utilización de rugosidad artificial, que comprende la incorporación en el fondo del canal de elementos de impacto y direccionadores de flujo de forma geométricamente regular. [Krochin, 1982] [Mostkov, 1954]. Al incluir estos elementos reductores de velocidad, se puede lograr la optimización de obras adyacentes como desarenadores, o sedimentadores, disminuyendo sus dimensiones y economizando así en obras de gran magnitud, como canales de riego, presas hidroeléctricas, plantas de potabilización de agua, entre otras. [Salaheldin, 2000], [Chaudhry, 2008]

En la literatura, existen diversas propuestas para la implementación de rugosidad artificial, entre las que se tienen: Paredes en zigzag a lo largo de la sección transversal, bloques rectangulares espaciados una distancia dada, paredes en forma de cuña, lecho de roca o piedras gruesas entre otros. Estos elementos ayudan a disipar energía y disminuir la velocidad del agua. [Krochin, 1982]

Varios estudios experimentales se han desarrollado para determinar la eficiencia en la disminución de la velocidad de los diversos tipos de rugosidades artificiales planteadas, [Johnson, 1944], [Robinson and Albertson, 1952], [Knight and Macdonald, 1979], generándose ábacos que permiten replicar el diseño de este tipo de estructuras para condiciones de funcionamiento específicas.



La alta tridimensionalidad de los flujos que ocurren en muchos de los casos de aplicación de la hidráulica en la ingeniería disminuye la aplicabilidad de teorías experimentales obtenidas en ambientes controlados de laboratorio donde generalmente el flujo es asumido como unidimensional, en cuyos casos una validación y/o verificación del caso específico es necesaria mediante la aplicación de modelos físicos donde se replica el proceso de flujo en cuestión. [Carrillo, 2018].

Un modelo físico es una representación a escala de un elemento para su análisis. Para el estudio de la mecánica de fluidos la utilización de modelos físicos ha sido una práctica altamente utilizada, un modelo físico no solo es una representación a escala geométrica del elemento original sino que adicionalmente, dependiendo de la naturaleza del proceso de flujo se debe cumplir la escala cinemática con lo que se establece que los procesos hidráulicos observados en modelo sean representativos de los que ocurrirían en la realidad (prototipo). La utilización de modelos físicos ha sido ampliamente utilizada, pero la construcción de un modelo de la obra real tiene ciertas complicaciones y limitaciones que no permiten mayor flexibilidad para el análisis de diversos escenarios. [Guzmán, 2015].

Como alternativa al estudio en modelos físicos, ha surgido la utilización de modelos numéricos, que resuelven numéricamente las ecuaciones de gobierno del flujo de fluidos para un dominio discretizado. La principal ventaja que tienen los modelos numéricos sobre los modelos físicos es la relativa simplicidad con la que se pueden analizar diferentes escenarios en comparación con el trabajo que representa el cambio de las condiciones de una experimentación física, otra ventaja adicional de la modelación numérica es el detalle de los resultados que se obtienen, a pesar de que se trabaje con un dominio discretizado (no continuo), se tienen los parámetros de flujo (calados y velocidades entre los principales) para cada celda de dominio discreto, mientras que en una experimentación en laboratorio, generalmente las medidas son más puntuales [Vasquez, 2013].

A pesar de que la modelación hidráulica numérica resuelve las ecuaciones de gobierno en un dominio discretizado, existen procesos hidráulicos importantes que se producen a escalas menores a las de una celda del dominio. La resolución de todas las escalas de los procesos hidráulicos en la actualidad no es posible debido al alto costo computacional y de almacenamiento requerido, por lo que la simulación numérica también aplica simplificaciones y modelos de la realidad, por lo que requiere cierto nivel de validación y/o verificación. Es por esto que, una práctica muy adecuada es la aplicación de modelación física conjuntamente con modelación numérica [Nguyen, 2004].

En el presente trabajo de titulación se realiza la simulación numérica del proceso de flujo que ocurre sobre un canal abierto con rugosidad artificial. Las simulaciones se realizarán para un modelo de canal con alta pendiente. El objetivo del presente trabajo es la validación de los parámetros experimentales para las estructuras de rugosidad artificial, definidas en la literatura y el planteamiento inicial de estructuras similares que dispongan de una mayor eficiencia en la reducción de velocidad de flujo.

## 2. Metodología:

El análisis numérico a desarrollarse en el presente estudio comprende la simulación de algunos de los elementos de rugosidad artificial definidos en [Krochin, 1982].

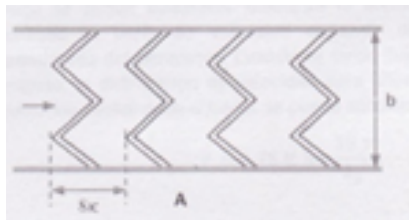
### 2.1. Rugosidad Artificial.

Son elementos en forma de bloques, barreras, hendiduras, o protuberancias dentro de un canal que simulan un aumento de la rugosidad en el mismo y afecta el flujo de un líquido, disminuyendo la velocidad a la que circula [Krochin, 1982].

En canales de con pendientes altas, la velocidad del flujo puede llegar a causar pérdida de revestimiento o erosión, y requieren de obras muy costosas para disipar energía. [Krochin, 1982]. En 1935, el profesor F.I. Pikalov realizó varios experimentos utilizando diversos tipos de rugosidad artificial, de esto se determinó que el coeficiente C de Chezy se puede obtener de forma empírica, aplicando fórmulas que son función de las relaciones de altura de flujo, altura del bloque de rugosidad y del ancho del canal.

Las fórmulas determinadas para los diferentes tipos de rugosidad artificial se pueden encontrar en el libro de Diseño Hidráulico [Krochin, 1982] y se presentan a continuación.

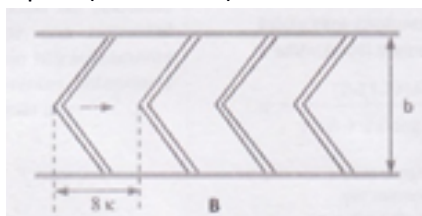
- Tipo A (Doble zigzag):



$$\frac{1000}{c} = 116,1 - 6,1 * h/k - 1,2 * b/h$$

*Ecuación 1*

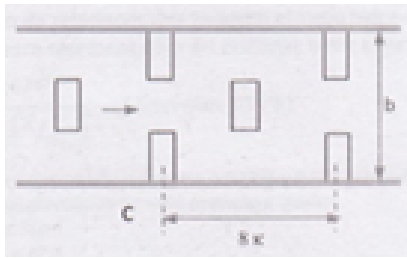
- Tipo B (V invertida):



$$\frac{1000}{c} = 85,8 - 3,9 * h/k - 0,8 * b/h$$

*Ecuación 2*

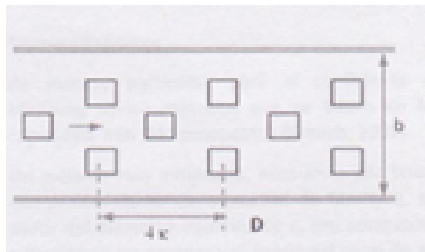
- Tipo C (Barrotes Cortados):



$$\frac{1000}{c} = 54,2 - 2,1 * \frac{h}{k} + 0,33 * \frac{b}{h}$$

*Ecuación 3*

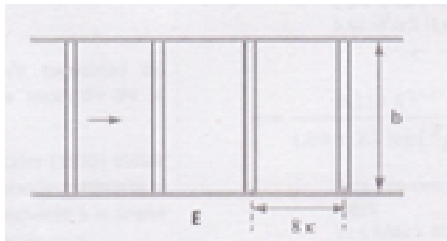
- Tipo D (Dados):



$$\frac{1000}{c} = 52 - 5,1 * \frac{h}{k} - 0,8 * \frac{b}{h}$$

*Ecuación 4*

- Tipo F (Barras continuas):



$$\frac{1000}{c} = 47,5 - 1,2 * \frac{h}{k} - 0,1 * \frac{b}{h}$$

*Ecuación 5*

Todos los modelos de rugosidad artificial corresponden a una adaptación de [Mostkov, 1954].

Donde  $h$  es la altura del agua sobre la rugosidad,  $k$  es la altura del bloque de rugosidad y  $b$  es el ancho del canal (generalmente rectangular).

El rango de aplicación para las fórmulas propuestas anteriormente sirven para valores de

$h/k \geq 3$ , y su límite máximo difiere del tipo de rugosidad que se utilice.

El espaciamiento entre bloques recomendado es de  $8k$  considerando que un espaciamiento muy pequeño anularía la efectividad de los bloques actuando como un fondo liso; por otro



lado, un espaciamiento muy grande tampoco es efectivo pues el flujo retenido en un primer bloque recupera su velocidad hasta llegar al siguiente y al chocar produce salpicaduras y ondas, afectando las condiciones de flujo.

También se debe tener en consideración que el coeficiente  $C$  de Chezy aumenta conforme lo hace la pendiente del canal, la altura de flujo y el caudal. Para pendientes y caudales bajos los bloques de rugosidad no tienen objeto de ser, mientras que para pendientes demasiado altas simplemente no son efectivos y se debe optar por otro tipo de metodología de disipación como rápidas en escalera [Krochin, 1982].

Para el diseño de un canal con rugosidad artificial primero deben definirse las dimensiones y pendiente del canal, la velocidad del canal sin rugosidad, y se debe imponer un valor de velocidad a la que se desea llegar (menor a la del canal).

Con la velocidad de reducción se calcula un coeficiente  $C$  de Chezy y se elige un tipo de rugosidad; utilizando las expresiones desde la Ecuación 1 hasta la Ecuación 5 se puede despejar las relaciones  $h/k$  y  $b/h$ , o se pueden ajustar estas relaciones a valores predeterminados. Se debe recalcular el coeficiente de Chezy con estos nuevos valores y comprobar que la velocidad obtenida cumpla con las condiciones impuestas. La velocidad se puede calcular utilizando la Ecuación 6.

$$V = C * \sqrt{Rh * So}$$

*Ecuación 6.*

## **2.2. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).**

Con el incremento de la capacidad de los ordenadores en los últimos años, se ha vuelto posible realizar simulaciones numéricas del comportamiento de los fluidos en diferentes escenarios. [Valero, 2015]. No fue hasta 1933 cuando en Inglaterra, [Thom, 1933] realizó la primera simulación numérica del flujo alrededor de un cilindro para velocidades bajas; aún entonces resultaba muy poco práctico el uso de esta metodología debido al excesivo tiempo que se requería para resolver problemas que actualmente resultan sencillos. Esta primera simulación fue validada en Japón por [Kawaguti, 1953], quien tardó aproximadamente un año y medio para resolver las ecuaciones del flujo de Navier – Stokes y únicamente para un número de Reynolds de 40.

La dinámica de fluidos computacional (CFD) está basada en la solución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes; estas son un conjunto de ecuaciones con derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido en una, dos y tres dimensiones. Fueron deducidas por el ingeniero y físico francés Claude-Louis Navier y por el matemático y físico irlandés George Gabriel Stokes. Estas ecuaciones se obtienen aplicando los principios de la mecánica y termodinámica a un fluido, luego aplicando la ley de viscosidad de Newton se obtiene la formulación diferencial que es normalmente utilizada para la resolución de problemas relacionados con la mecánica de fluidos [Anchenson, 1990]. En la Ecuación 7 se observan las ecuaciones del flujo de Navier – Stokes.



$$\rho \left( \frac{\delta v_x}{\delta t} + v_x \frac{\delta v_x}{\delta x} + v_y \frac{\delta v_x}{\delta y} + v_z \frac{\delta v_x}{\delta z} \right) = \mu \left[ \frac{\delta^2 v_x}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 v_x}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 v_x}{\delta z^2} \right] - \frac{\delta P}{\delta x} + \rho g_x$$

$$\rho \left( \frac{\delta v_y}{\delta t} + v_x \frac{\delta v_y}{\delta x} + v_y \frac{\delta v_y}{\delta y} + v_z \frac{\delta v_y}{\delta z} \right) = \mu \left[ \frac{\delta^2 v_y}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 v_y}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 v_y}{\delta z^2} \right] - \frac{\delta P}{\delta y} + \rho g_y$$

$$\rho \left( \frac{\delta v_z}{\delta t} + v_x \frac{\delta v_z}{\delta x} + v_y \frac{\delta v_z}{\delta y} + v_z \frac{\delta v_z}{\delta z} \right) = \mu \left[ \frac{\delta^2 v_z}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 v_z}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 v_z}{\delta z^2} \right] - \frac{\delta P}{\delta z} + \rho g_z$$

### Ecuación 7

*Fuente: [Vazquez, 2004]*

Con estas ecuaciones se puede conocer el movimiento de los fluidos, tan complejos como son la atmósfera terrestre, corrientes oceánicas, o más simples como el flujo que rodea un vehículo o el agua que circula por un canal con rugosidad artificial. Por mucho tiempo resultó muy complicado el uso completo de esta metodología debido a la poca capacidad computacional que existía, pudiendo únicamente desarrollarse modelaciones en dos dimensiones o simplificando las ecuaciones de flujo hasta el punto de poder resolverlas a mano [English, 2017]. La importancia de la modelación numérica nace de la necesidad de los investigadores de poder analizar varios escenarios de manera más efectiva, además de reducir las imprecisiones que pueden presentarse en los modelos físicos. Es a partir de los años 1950's en los que el desarrollo tecnológico tomó fuerza, y el uso de la dinámica de fluidos computacional empezó a ser considerado como una herramienta viable para el análisis de los procesos de flujo. A partir de 1967 esta metodología ha sido explotada para el diseño de aeronaves, y ha sido optimizada, para hacerlo más potente y accesible para desarrollos cada vez más complejos. Gran parte del desarrollo de CFD corresponde a las grandes compañías como son NASA y Boeing, y en 1995 las compañías de automóviles como GM y Ford adoptaron la tecnología para el diseño de vehículos aerodinámicos [English, 2017]. Otra aplicación de igual importancia es la modelación del comportamiento de fluidos a su paso por estructuras hidráulicas, desde la implementación de las CFD para el análisis de estructuras hidráulicas, se han generados varios casos de estudio, desde movimiento del agua en lagos y ríos, hasta el comportamiento del flujo en canales abiertos, presas hidroeléctricas, vertederos, etc. Mediante la implementación de un modelo numérico en estructuras hidráulicas se permite el análisis de varios escenarios con relativa facilidad, cambiando las condiciones iniciales para la simulación o geometría de la obra, en tiempos relativamente cortos, en comparación con el trabajo que representa el cambio de las condiciones de una experimentación física (en laboratorio). Otra ventaja adicional de la modelación numérica es el detalle de los resultados que se obtienen, a pesar de que se trabaje con un dominio discretizado (no continuo), se tienen los parámetros de flujo (calados y velocidades entre los principales) para cada celda de dominio discreto, mientras que en una experimentación en laboratorio, generalmente las medidas son más puntuales y representativas de las condiciones promedio. [Vasquez, 2013].

Para la simulación numérica se utilizaron los datos medidos en el canal de pendiente variable del Laboratorio de Hidráulica y Dinámica de Fluidos de la Facultad de Ingeniería de la

Universidad de Cuenca. Este canal tiene un ancho de 0.30 m y unas paredes de 0.45 m de altura. En la Ilustración 1 se muestra dicho canal.

Se realizaron varias pruebas en el canal del laboratorio con el objetivo de determinar el coeficiente de rugosidad de Manning del canal. Se llevaron a cabo mediciones de caudal, calado y velocidad del agua para que, mediante una variación de la ecuación de flujo uniforme de Manning (Ecuación 8), poder determinar el valor de la rugosidad.



*Ilustración 1 Canal abierto del laboratorio de Hidráulica*

$$n = \frac{A^{5/3} * \sqrt{S_0}}{Q * P^{2/3}}$$

*Ecuación 8*

Para el control de flujo en el canal, se cuenta con un vertedero triangular a la entrada, el cual permite la estimación del caudal mediante la Ecuación 9,

$$Q = 1.1241 * H^{2.6085}$$

*Ecuación 9*

Dónde: Q es el caudal del canal en [m<sup>3</sup>/s]

H es la altura del agua desde la parte más baja del vertedero hasta la superficie, medida a una distancia de 30 centímetros aguas arriba [m].

Para las pruebas de laboratorio se utilizó una pendiente del canal del 2.5%. En la *Tabla 1* se muestran los resultados de los ensayos realizados en el canal de laboratorio para la calibración de su coeficiente de rugosidad.

<i>Tabla 1: Datos de los ensayos en el canal del laboratorio.</i>						
H [cm]	y [cm]	Q [m <sup>3</sup> /s]	A [m <sup>2</sup> ]	P [m]	V [m/s]	n
23.59	5.44	0.026	0.01632	0.4088	1.5916429	0.0116
21.23	4.9	0.0197	0.0147	0.398	1.3422601	0.0130
18.51	3.6	0.0138	0.0108	0.372	1.2776469	0.0117
13.4	2.19	0.0059	0.00657	0.3438	0.9042582	0.0125
4.35	0.7	0.00032	0.0021	0.314	0.1503436	0.0373
						<b>0.0122</b>

De estos resultados se obtiene un coeficiente de rugosidad de Manning para el canal de 0.0122 el cual se utilizará para el diseño de los bloques de rugosidad. Se descartó la última medición debido a que el caudal resultó muy bajo y se obtuvo un resultado con mucha dispersión con respecto a los demás obtenidos.

### 2.3. Diseño de los bloques de rugosidad artificial.

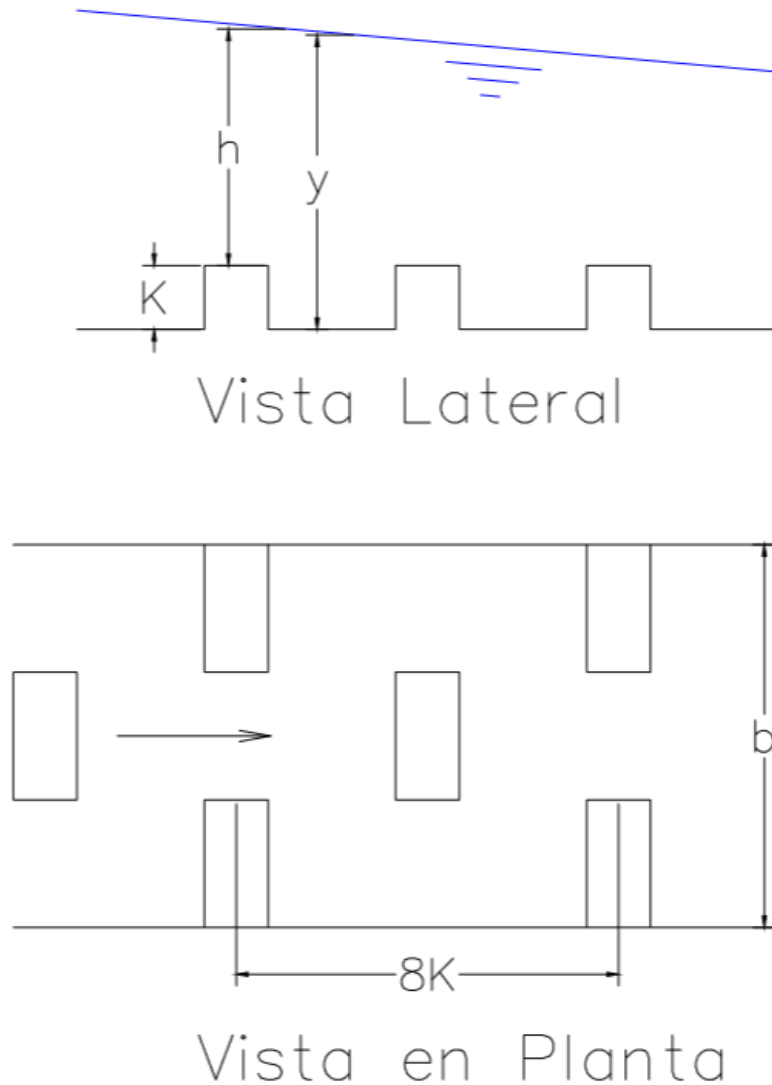
Para el diseño de los bloques de rugosidad artificial se requiere establecer un caudal de diseño y determinar con este la altura de flujo normal y la velocidad en el canal para este caudal utilizando el coeficiente de rugosidad  $n$  de Manning determinado en las pruebas. En caudal de diseño elegido es el máximo para el canal del laboratorio,  $Q = 26$  L/s, se estableció una pendiente del 10% para que el canal sea calificado como de alta pendiente [Anonymous, 2013]. En la *Tabla 2* se muestran los datos iniciales del canal, con los que se realizó el diseño de los bloques de rugosidad.

<i>Tabla 2: Datos iniciales para el canal.</i>		
Caudal (Q)	0.026	m <sup>3</sup> /s
n de Manning	0.0122	
Base (b)	0.3	m
Pendiente (So)	0.1	
Altura de flujo normal (y)	0.0356	m
	3.56	cm
Área (A)	0.011	m <sup>2</sup>
Velocidad (v)	2.43	m/s

Se diseñará, para objetivos de comparación, una rugosidad Tipo C (Barrotes Cortados). En la *Ilustración 2* se observa un esquema en vista lateral y en planta de la rugosidad elegida. Los barrotes tendrán un ancho igual a un tercio de la base del canal ( $b/3$ ), y estarán ubicados a lo largo de todo el canal de simulación.

Se establece la relación que indica que la altura de flujo en el canal es igual a la suma de la altura de los bloques de rugosidad y la altura del agua sobre los bloques.

$$Y = k + h.$$



*Ilustración 2 Modelo de rugosidad Tipo C “Barros Cortados”*

*Fuente: Mostkov, (1954)*

Se tomó una relación  $h/k = 3$ , y teniendo la altura de flujo normal para el canal se determinó el valor del coeficiente  $C$  de Chezy para determinar la nueva velocidad del canal aplicando los bloques de rugosidad artificial.

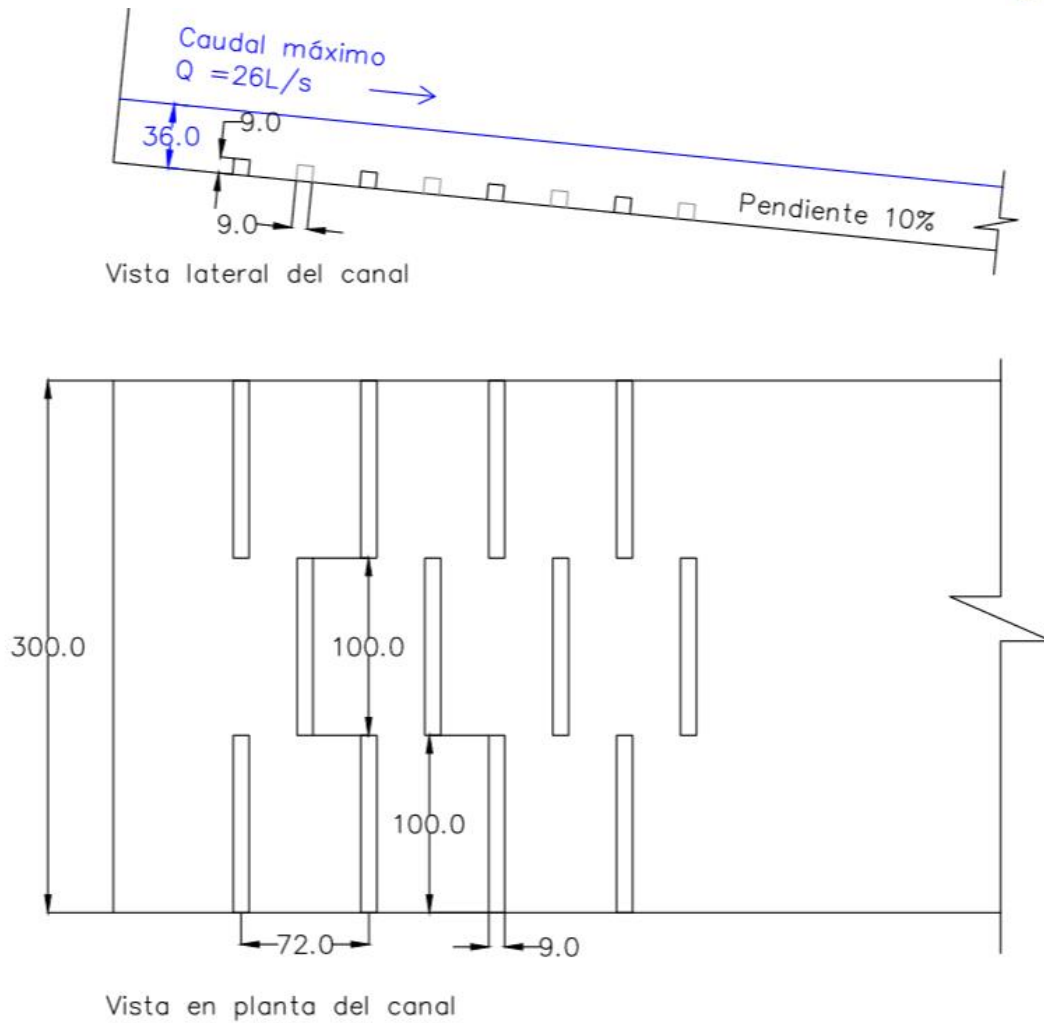
Mediante un proceso iterativo se determinó la altura de los bloques de rugosidad  $k$  y la altura sobre los bloques  $h$  para que se cumpla la relación mostrada en la Ilustración 2 de  $y = k + h$ .



Utilizando la Ecuación 3 y remplazando las relaciones  $h/k$  y  $b/h$  se tiene para el canal un coeficiente  $C$  de Chezy = 19.3855. Finalmente se determinó el área, perímetro y radio hidráulico, para que, utilizando la Ecuación 6 determinar la nueva velocidad media teórica del canal. En la Tabla 3 se muestra un resumen del proceso de dimensionamiento de los bloques de rugosidad.

<i>Tabla 3: Dimensiones de bloques de rugosidad. <math>Q = 26 \text{ L/s}</math></i>		
$h/k$	3	
$K$	0.009	m
$h$	0.027	m
$h+k=Y$	0.0356	m
$b/h$	11.23	
$C$	19.3855	
Por lo tanto.		
Área	0.0107	$\text{m}^2$
Perímetro	0.3713	m
$R_h$	0.0288	m
$V_{\text{final}}$	1.040	m/s

En la Ilustración 3 se muestran los bloques colocados en el canal, con sus respectivas dimensiones, de esta manera se procederá a crear la malla correspondiente para proceder con la simulación numérica.



*Ilustración 3: Bloques de rugosidad tipo C – Dimensiones en [mm]. La flecha indica la dirección del flujo.*

Adicionalmente, se consideró una simulación para un caudal de 20 L/s. Para este caso se determinó la altura de flujo normal y la velocidad para dicho caudal, estos datos se muestra en la *Tabla 4*.

Manteniendo las dimensiones de los bloques de rugosidad diseñados previamente, se obtuvo la velocidad media teórica para el canal con un caudal de 20 L/s. En la *Tabla 5* se presenta la velocidad de flujo en el canal luego de atravesar los bloques de rugosidad artificial.



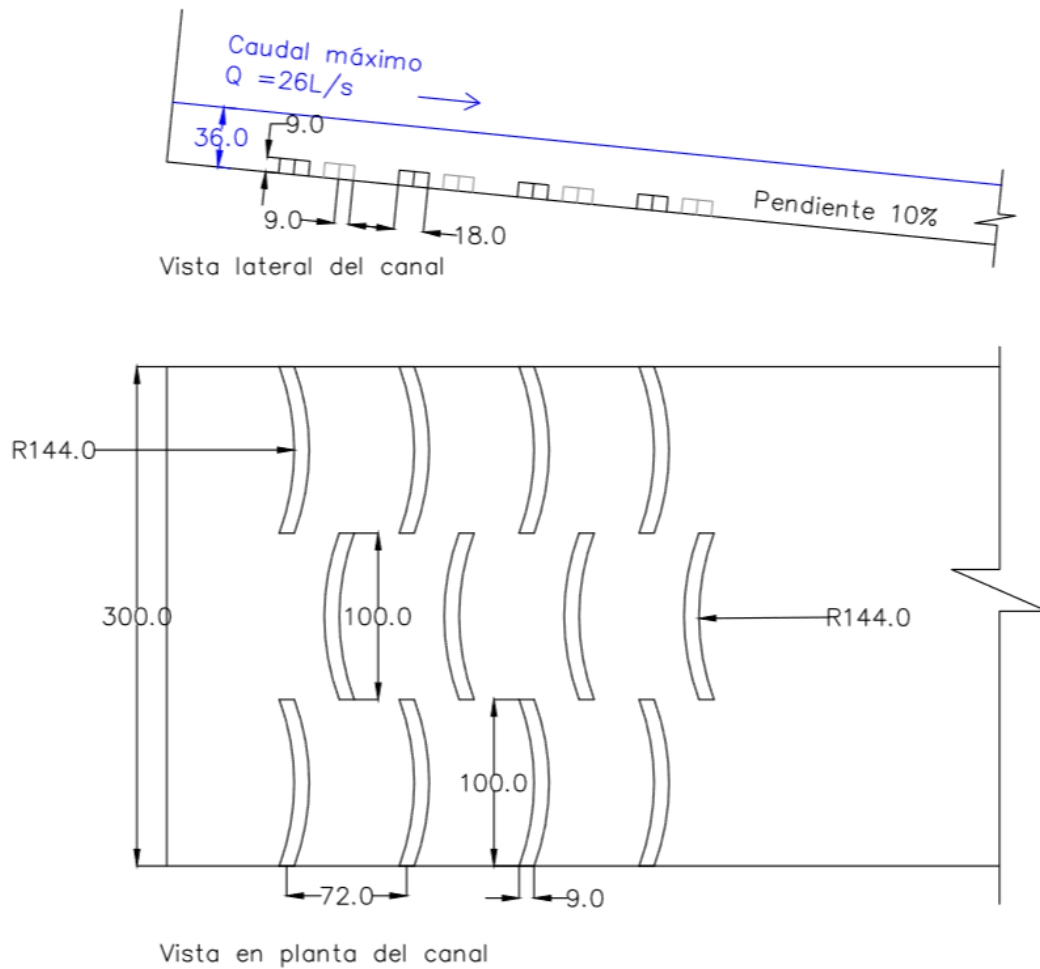
<i>Tabla 4: Datos iniciales para un caudal de 20 L/s.</i>		
Caudal (Q)	0.02	m <sup>3</sup> /s
n	0.012214	[-]
Base (b)	0.3	m
Pendiente (So)	0.1	[-]
Altura de flujo normal (y)	0.0301	m
	3.01	cm
Área (A)	0.009	m <sup>2</sup>
Velocidad (v)	2.22	m/s

<i>Tabla 5: Dimensiones de bloques de rugosidad. Q = 20 L/s</i>		
h/k	3	[-]
K	0.009	m
h	0.027	m
h+k=Y	0.0360	m
b/h	11.11	[-]
C	19.3925	[-]
Por lo tanto.		
Área	0.0090	m <sup>2</sup>
Perímetro	0.3602	m
Rh	0.0251	m
V final	0.970	m/s

## 2.4. Rugosidad Artificial Modificada.

En el presente proyecto se propone una modificación de los bloques de rugosidad tipo C diseñados anteriormente, para este propósito se han creado dos modelos de rugosidad modificados en los cuales los barrotes fueron reemplazados por arcos de circunferencia, estos modelos serán denominados Rugosidad Artificial Modificada 1 y 2.

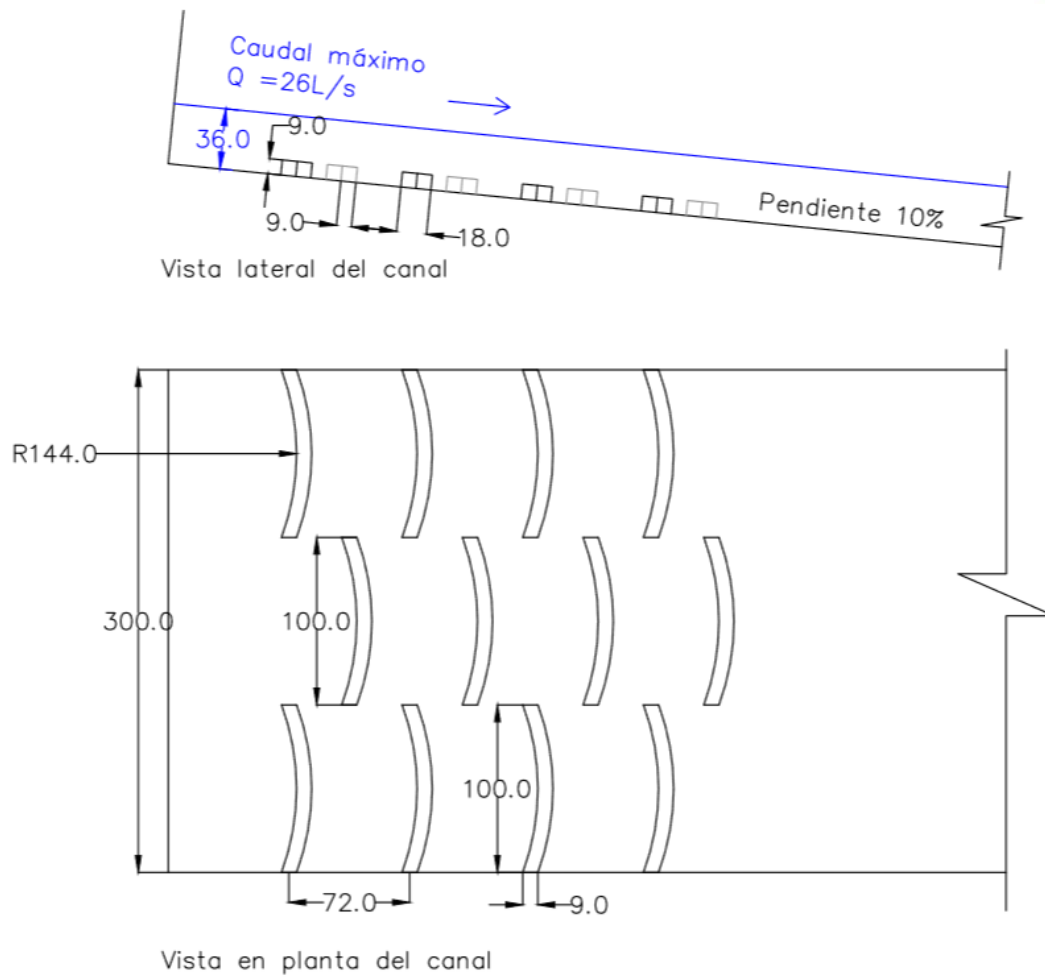
Para la rugosidad artificial modificada 1 (RAM 1), se realizó el diseño colocando los bloques de manera alternada, tal como se muestra en la Ilustración 4, tomando un radio de círculo igual a 16k, donde k es la altura de los bloques de rugosidad (ver Ilustración 2).



*Ilustración 4: Rugosidad artificial modificada 1 (RAM 1) – Dimensiones en [mm]. La flecha indica la dirección del flujo.*

Para la rugosidad artificial modificada 2 (RAM 2), se colocaron los bloques todos en la misma dirección con la parte cóncava de la circunferencia apuntando hacia aguas arriba del canal, tomando el mismo radio de círculo que para el modelo RAM 1. En la Ilustración 5 se puede observar el esquema realizado para la RAM 2.





*Ilustración 5: Rugosidad artificial modificada 2 (RAM 2) – Dimensiones en [mm]. La flecha indica la dirección del flujo.*



### 3. Simulación Numérica.

El análisis numérico para este proyecto será llevado a cabo utilizando un software de uso libre llamado OpenFoam (Open Field Operation And Manipulation). Este se trata de un programa de la dinámica de fluidos computacional (CFD), que permitirá resolver las ecuaciones del gobierno del movimiento de fluidos de Navier- Stokes, para un dominio discreto.

#### 3.1. Construcción de la Malla.

Para la simulación se construyeron 3 mallas utilizando el software especializado Salome – Meca, el cual permite exportar el trabajo a un formato compatible con OpenFoam (el Software en donde se realizará la simulación numérica).

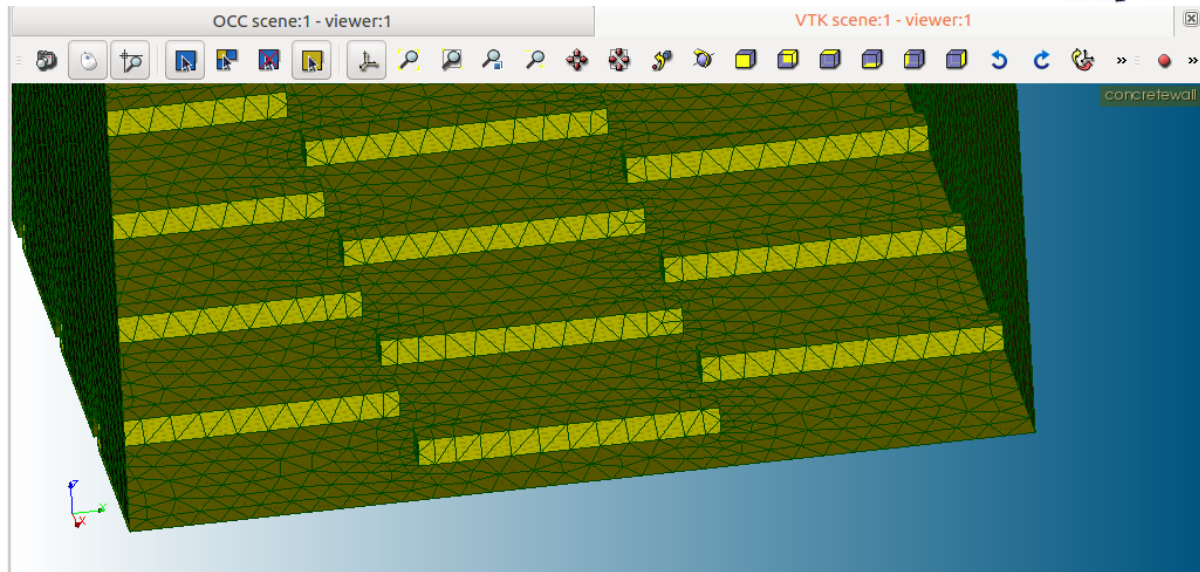
Es importante mencionar que el programa Salome-Meca puede generar una malla en 2D o 3D automáticamente en una superficie definida; la malla tiene celdas forma triangular pero se puede variar esta forma según sea necesario, a una rectangular o hexagonal. También se puede variar el tamaño de las celdas que componen la malla de acuerdo a la precisión que se requiera.

Para verificar la calidad de la malla a utilizarse, se siguen los criterios de ortogonalidad, simetría, relación de aspecto. Todo esto se realiza debido a que una malla de buena calidad se traduce en menores tiempos de simulación, mayor convergencia y resultados confiables.

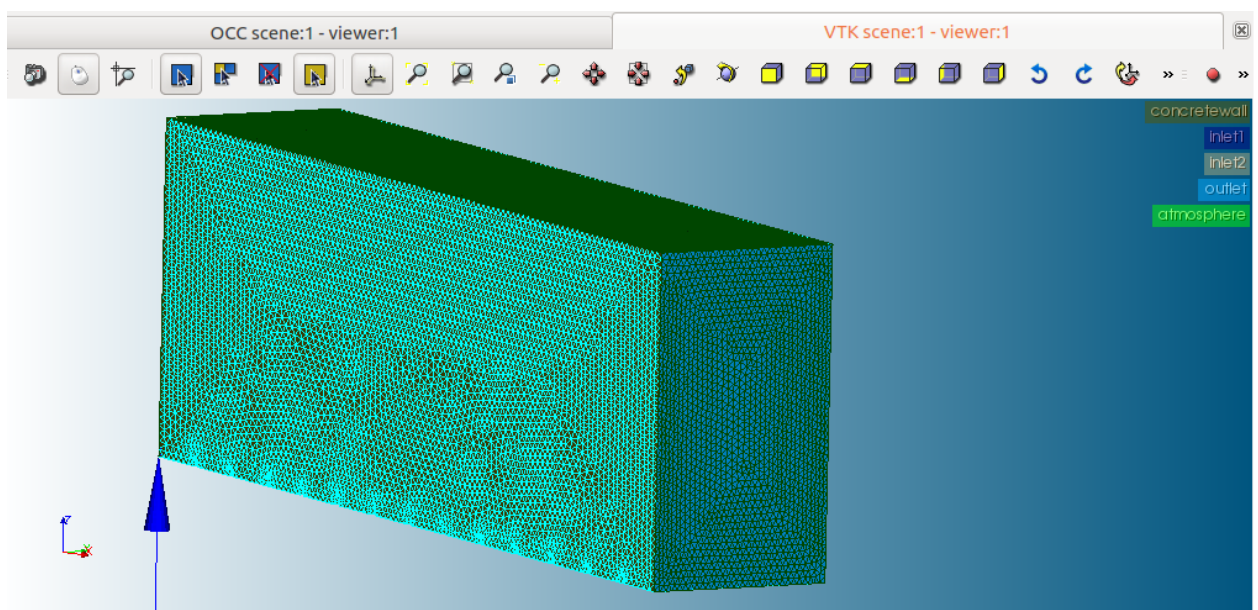
Se deben ingresar valores para dimensiones máximas y mínimas de las celdas con el fin de obtener una malla que constituya una réplica adecuada (con el mayor nivel de precisión posible) del dominio real del proceso a estudiar, sin que aquello represente una simulación de un tiempo extremadamente prolongado con requerimientos de capacidad de almacenamiento muy grandes. Además, una malla demasiado fina, puede tardar mucho tiempo en crearse, es por eso que se debe tener un balance entre una malla de tamaño adecuado y entre aquella que otorga resultados precisos con el menor error posible.

Al crear la malla dentro del programa Salome-Meca, se puede asignar directamente la calidad de la malla, refinando la malla tanto como se desee y dando dimensiones máximas y mínimas al tamaño de las celdas. De esta manera se genera una malla de buena calidad para las simulaciones.

OpenFoam permite comprobar la calidad de una malla mediante el comando: *checkMesh*. Aplicando este comando se muestran las características de la malla que se ha exportado al programa OpenFoam, y se verifica que los parámetros cumplan valores mínimos y máximos para asegurar la convergencia del modelo durante la simulación. En la Ilustración 6 e Ilustración 7 se muestra un esquema de la malla.



*Ilustración 6 Detalle del Mallado del canal – Bloques de rugosidad Tipo C.*



*Ilustración 7 Detalle del Mallado del canal.*

Para obtener mayor información sobre la creación de una malla mediante el Software Salome, referirse al Apéndice C.



Para cada uno de los modelos de rugosidad mostrados en la Ilustración 3, Ilustración 4 e Ilustración 5, se desarrolló una malla específica que represente los bloques de rugosidad con sus respectivas características geométricas (ver Tabla 3). La malla creada tiene celdas de un tamaño máximo de 1cm y mínimo de 0.5cm. Se asignaron características específicas a cada una de las paredes que la componen; se definieron las siguientes condiciones de frontera:

Previo a la simulación, se ejecutó el comando *checkMesh* para determinar si cada una de las mallas creadas cumplen con los criterios de buena calidad y así obtener resultados confiables. Se comprobó la relación de aspecto en la malla y la no-ortogonalidad debido a que la malla se realizó con tetraedros y con celdas triangulares. Se muestra pues en la Tabla 6 los criterios de calidad para cada una de las mallas.

<i>Tabla 6 Calidad de la malla</i>			
<b>Malla</b>	<b>Relación de Aspecto</b>	<b>No-ortogonalidad</b>	
<b>Canal</b>	4.87	14.37	ok
<b>Tipo C</b>	4.98	14.4	ok
<b>RAM1</b>	4.74	14.69	ok
<b>RAM2</b>	4.52	14.66	ok

Para las diferentes mallas utilizadas se observa que se tiene una relación de aspecto máxima de 4.98 para la malla de rugosidad Tipo C, este valor está dentro del rango aceptable para simulaciones en las que intervienen desplazamientos (con un valor máximo de 10) [Hidalgo, 2001]. Y el valor máximo de no ortogonalidad es de 14.69 para el modelo RAM 1.

Condiciones de frontera e iniciales para la simulación.

Las condiciones del canal implementadas en la simulación numérica comprende: dos paredes laterales, una base, una pared superior, una entrada y una salida.

A las paredes y la base se les asignó una condición impermeable y antideslizante. Se considera además que la velocidad del flujo es igual a cero. Para la pared superior simplemente se le asignó la función de atmósfera cumpliendo así con la condición de un canal de aguas abiertas.

Para la entrada del canal se consideró un ingreso de agua y uno de aire, en el que el primero tendrá la altura de flujo normal definida en los ensayos de laboratorio, y para la entrada de aire se asignó una presión igual a la atmosférica (presión manométrica igual a cero).

Para la salida del canal se asignó la presión igual a cero, y aquí se calculará la velocidad final del flujo.

Dentro de las pruebas en laboratorio se determinó que el flujo es turbulento, por tanto se asignó esta misma condición al modelo. Se utilizaron para las simulaciones numéricas los dos caudales, que corresponde a los caudales simulados en laboratorio, el caudal de 26 L/s y un caudal inferior de 20 L/s.

Para todos los modelos se utilizó una pendiente del 10%, para de esta manera coincidir con la pendiente dada al canal al momento de diseñar los bloques de rugosidad artificial.



### 3.2. Validación del modelo:

Se debe verificar que la simulación numérica replique los procesos reales de forma adecuada. Utilizando las simulaciones del canal de laboratorio se realizaron ajustes de los parámetros de la simulación numérica que permitan la obtención de condiciones de flujo similares para las mismas condiciones de entrada.

Se realizaron veinte simulaciones en las que se utilizaron diferentes valores para el coeficiente de rugosidad absoluta  $K_s$  y se determinó un valor de  $K_s = 0.0035$  el cual replica de mejor manera las condiciones dadas en el canal de laboratorio.

En el Anexo 1 se presenta la tabla completa con los resultados de las pruebas de calibración.

### 3.3. Selección del esquema solucionador para el modelo creado.

OpenFoam no cuenta con un único sistema de resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes para todos los casos que se presenten, en lugar de eso presenta varios tipos de esquemas identificados como “Solver’s” para cada una de las prestaciones que fueran requeridas. Los distintos esquemas van desde los más sencillos como los que utilizados para la simulación de flujo laminar de casos simples, hasta los que permiten la representación de fenómenos complejos, como comportamiento de flujo turbulento, resalto hidráulico, o el transporte de sedimentos. [Carrillo, 2018].

Dependiendo del tipo de problema que se desee resolver, para flujo compresible o incompresible, transitorio o estacionario, laminar o turbulento, se debe elegir el sistema de resolución [Greenshields, 2018]. Dentro del análisis que se tiene en este proyecto, se ha determinado que el flujo que pasará por el canal con rugosidad artificial será de carácter turbulento, además bifásico (es decir que se produce una mezcla de agua y aire).

Por esta razón se utilizará el esquema de solución llamado *interFoam* debido a que este trabaja con fluidos multifásicos, isotérmicos e inmiscibles y se adapta para la solución de ecuaciones dentro del Modelo RANS (Reinolds Averaged Navier-Stokes), el cual es un modelo de turbulencia simple, que además ocupa menor cantidad de recursos computacionales en comparación a otros modelos de turbulencia. [Min, 2017]; además el solucionador *interFoam* trabaja con el método Volume of Fluid (VOF), una técnica de modelación a superficie abierta, para discretizar las ecuaciones dentro de las mallas que se utilizarán para la simulación y determinar las zonas libres para el paso del flujo dentro de esta malla [Hirt, 1981].

### 3.4. Modelo de turbulencia k-omega.

El modelo de turbulencia (dentro de Modelo RANS) que utiliza openFoam corresponde al modelo k –Omega SST (shear –stress transport). Este modelo recrea flujos desarrollados e inestables; fue desarrollado por Menter en 1994 y combina modelos de turbulencia para flujos a superficie libre y con una subcapa viscosa, además agrega un término para el transporte de esfuerzo cortante. De esta manera se logra simular el comportamiento de un fluido cuando se encuentra cerca y lejos de un contorno sólido para números de Reynolds altos y bajos [Peng, 1996], [Greenshields, 2018]. A continuación se presenta las ecuaciones semiempíricas para los modelos k y  $\omega$  [Wilcox, 2008].



$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \rho P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \sigma_k \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right], \quad \text{donde } P = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

Ecuación 10

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\gamma \omega}{k} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \sigma_\omega \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\rho \sigma_d}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

Ecuación 11

### 3.5. Método de Volumen de Fluido

En canales abiertos la interacción entre el agua y el aire es un fenómeno muy común debido a que en la realidad el flujo no corre de manera laminar todo el tiempo, debido a esto el método VOF utiliza una función de fracción  $\alpha$ , una función escalar definida como la integral de la función característica de un fluido dentro de un volumen de control, o en este caso, el volumen de una celda en una malla en computadora = [Hirt, 1981] = [Hirt, 1981].

- Si,  $\alpha = 1$ , significa que la celda está ocupada por un líquido en el punto X,Y,Z y en el tiempo t.
- Si,  $\alpha = 0$ , significa que la celda está ocupada por un gas en el punto X,Y,Z y en el tiempo t.
- Si,  $\alpha < 1$ , significa que la celda está ocupada por una mezcla entre líquido y gas en el punto X,Y,Z y en el tiempo t. Esta corresponde a una zona de transición.

Con este método, la superficie libre no se define bruscamente, sino que se distribuye sobre la altura de una celda.

### 3.6. Parámetros para la simulación.

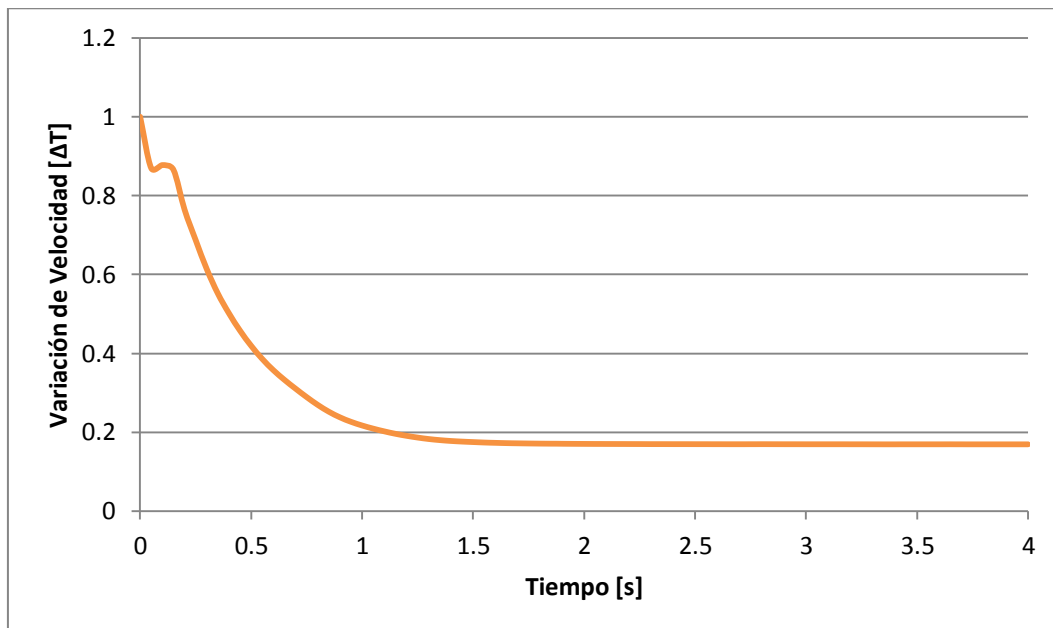
- La simulaciones se realizarán para un tiempo total de 4 segundos, se comprobó que para este tiempo se puede alcanzar un estado estacionario, de esta manera se puede asegurar que las velocidades obtenidas como resultado de la simulación no cambiarán más en el tiempo, llegando así a un resultado correcto.
- Cada simulación iniciará en tiempo  $t = 0$  y finalizará en un tiempo  $t = 4$ , se tomarán datos de la medición cada intervalo de tiempo  $\Delta t = 0.05$  segundos, debido a que el resultado de la simulación será medido en el tiempo final, por lo que no es necesaria tanta precisión para tiempos intermedios.
- Se comprobará que para cada simulación se alcance un estado estacionario, es decir que, al cumplirse el tiempo de la simulación la variación de la velocidad en el tiempo sea mínima. Esto significa que los resultados medidos no cambiarán para tiempos de simulación mayores.

## 4. Resultados.

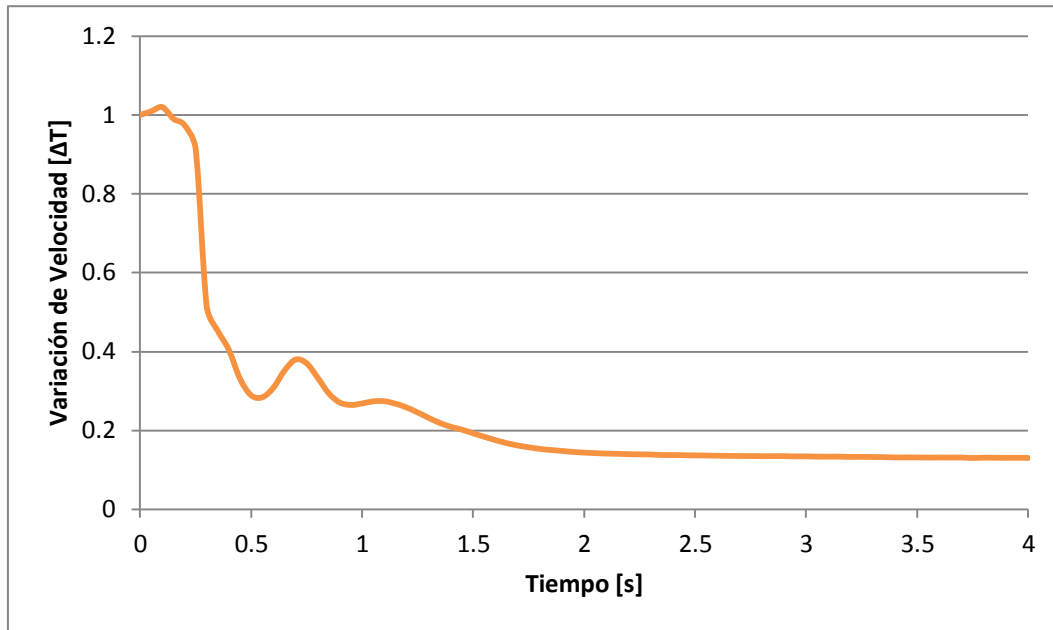
### 4.1. Estabilización del flujo en el canal.

Debido a que la simulación comprende un flujo turbulento, la velocidad dentro del canal presenta una gran variación a lo largo del tiempo de simulación, es por eso que se debe garantizar que la simulación llegue a un estado estacionario, es decir, que los resultados no varíen más al cumplir el tiempo de simulación. Por tanto se tomaron 3 puntos dentro del flujo en el canal, al inicio, centro y final a una altura desde el fondo de 0.5 cm; y se determinó la variación de velocidad en función del tiempo de simulación. Cuando se registró que la velocidad permanece constante en el tiempo, se puede decir que la simulación ha alcanzado un estado estacionario y que se ha alcanzado la convergencia.

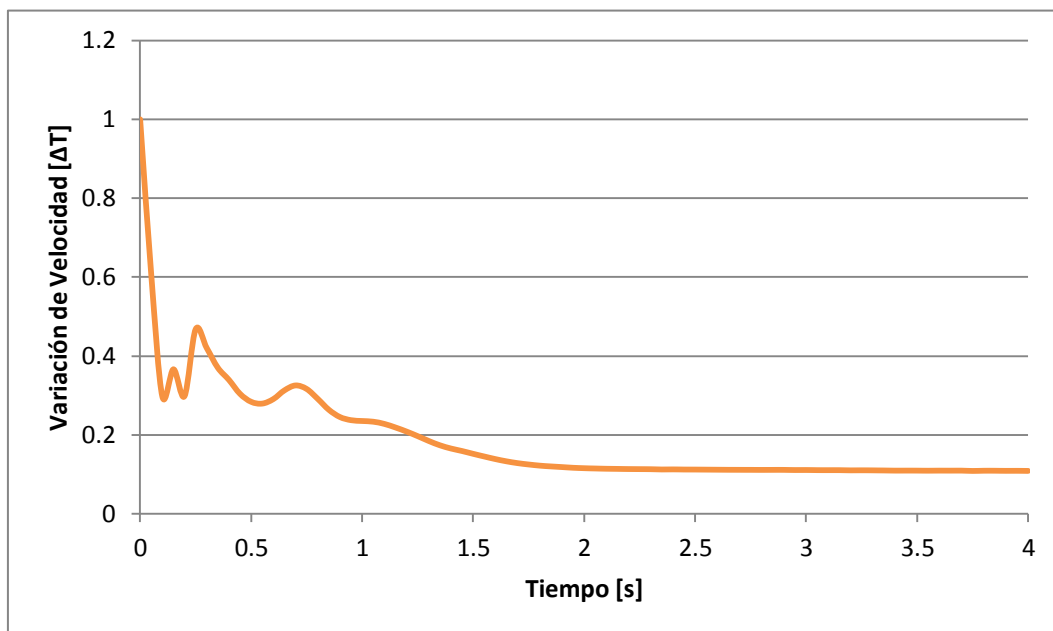
En la Ilustración 8, Ilustración 9 e Ilustración 10, se muestran las gráficas de la variación de velocidad vs tiempo para las pruebas de calibración con el caudal de 26 l/s, en donde se muestra que para un tiempo de simulación de 4 segundos la variación de velocidad es cero o muy cercana a cero, por lo que se ha alcanzado el estado estacionario y por tanto los resultados de velocidad mostrados en las ilustraciones son acertados.



*Ilustración 8: Gráfica de velocidad vs tiempo se simulación para un punto al inicio del canal.*



*Ilustración 9: Gráfica de velocidad vs tiempo se simulación para un punto en el centro del canal.*



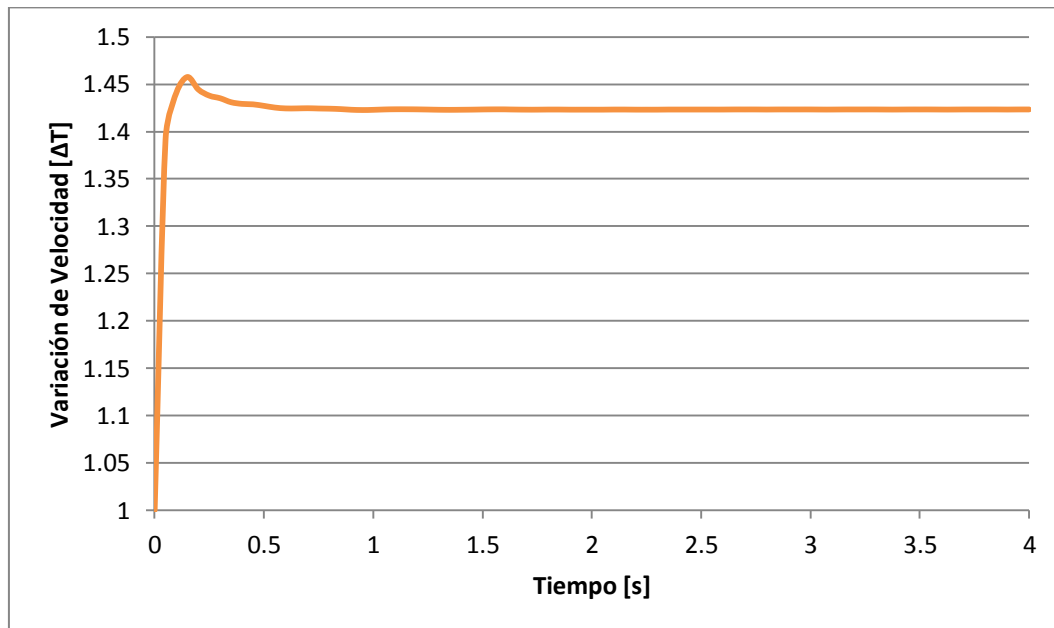
*Ilustración 10: Gráfica de velocidad vs tiempo se simulación para un punto al final del canal.*



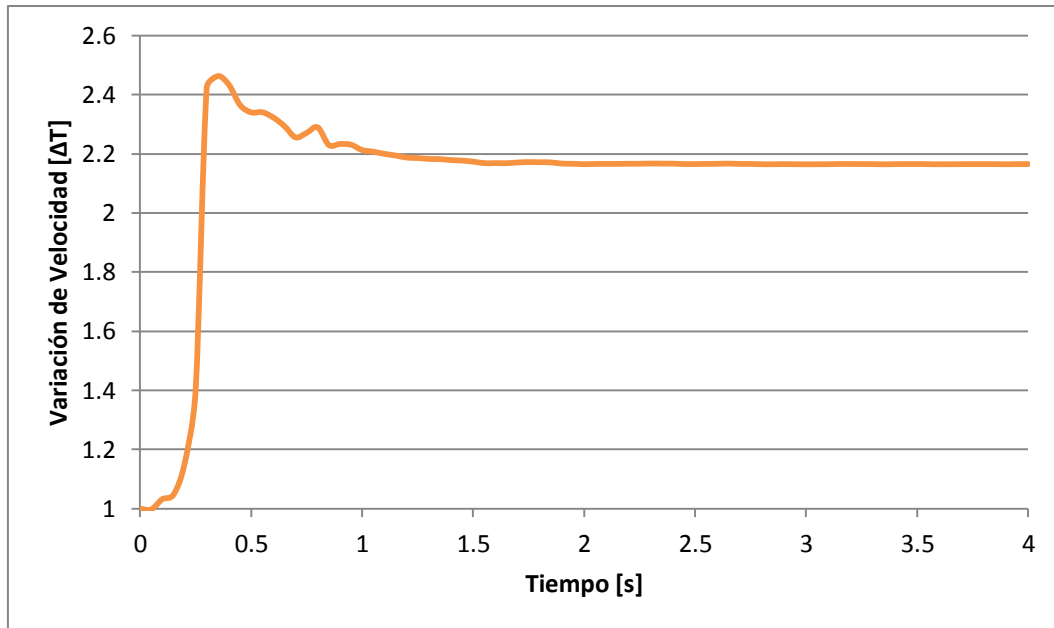
#### 4.2. Estabilización del flujo para los canales con Rugosidad Artificial.

Al igual que para la simulaciones correspondientes a la calibración de los parámetros de simulación, en cada una de las pruebas se escogió un punto dentro del dominio, al inicio, centro y final del canal con la misma altura; y se obtuvieron las gráficas que muestran la variación de la velocidad en el punto respectivo a lo largo del tiempo.

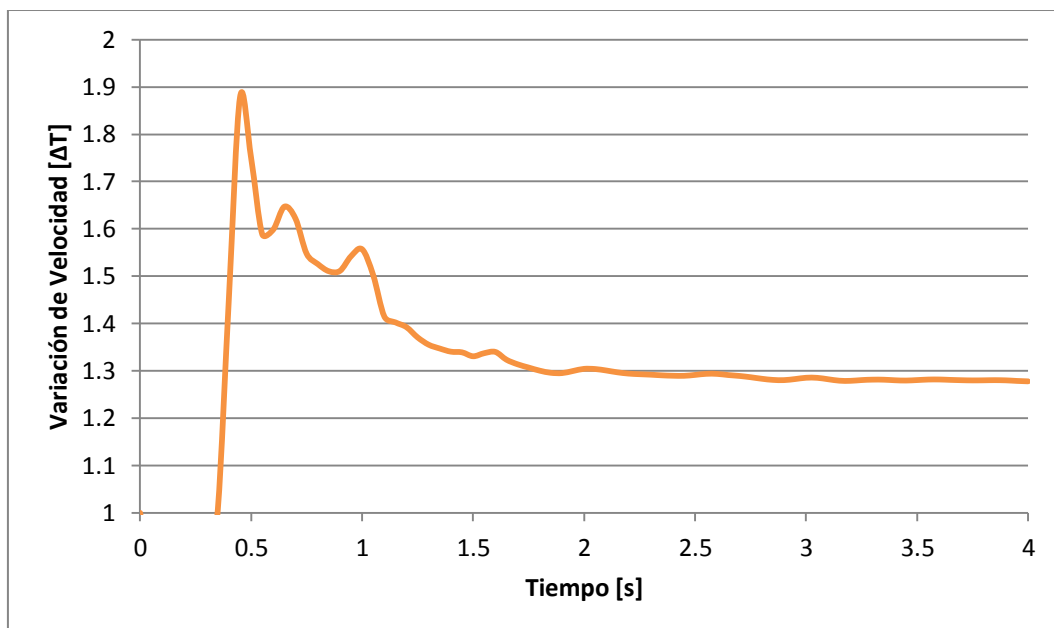
Desde la Ilustración 11 hasta la Ilustración 12 se muestran las gráficas de variación de velocidad en el tiempo para el modelo de Rugosidad Tipo C, para la primera prueba que consiste en una simulación del dominio completo y para la segunda prueba realizada con una división del dominio en varias partes (simulación en paralelo). De manera similar se muestran en las Ilustraciones de la Ilustración 13 a la Ilustración 14 y de la Ilustración 15 a la Ilustración 16 los gráficos respectivos de variación de velocidad con respecto al tiempo para las simulaciones realizadas en RAM 1 y RAM 2. Tal como se observa en la figuras después de transcurrido cierto tiempo la simulación se estabiliza y se alcanza un valor constante o que presenta oscilaciones pequeñas alrededor del mismo valor.



(a)

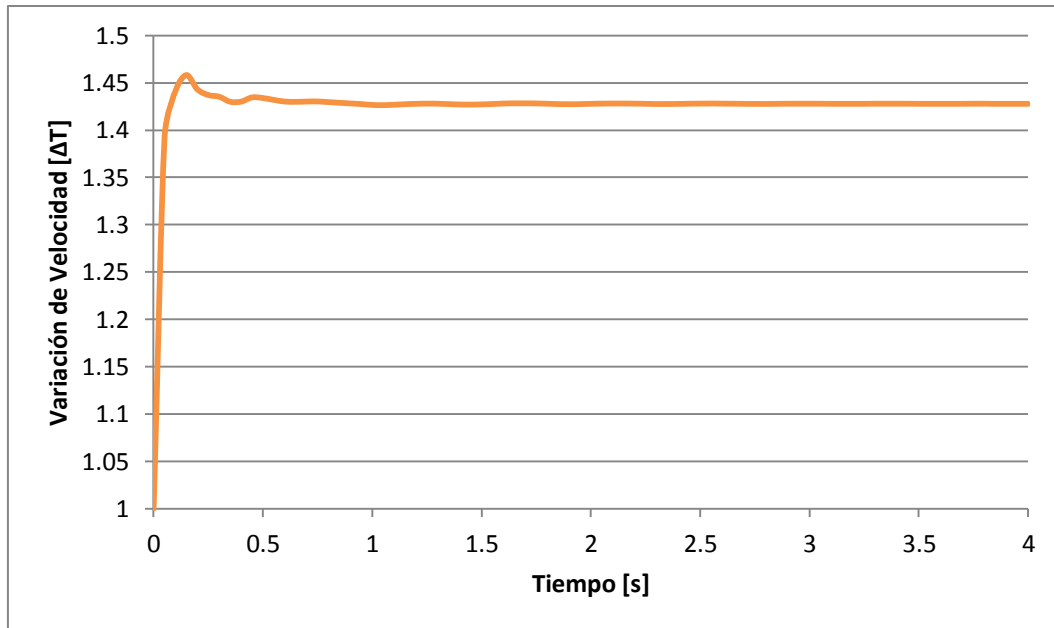


(b)

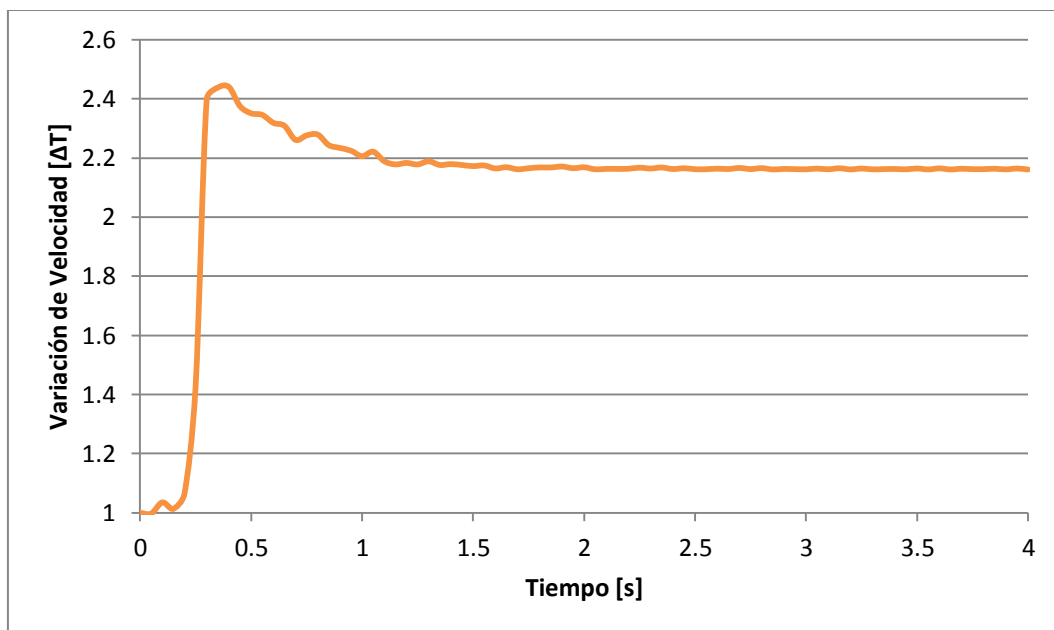


(c)

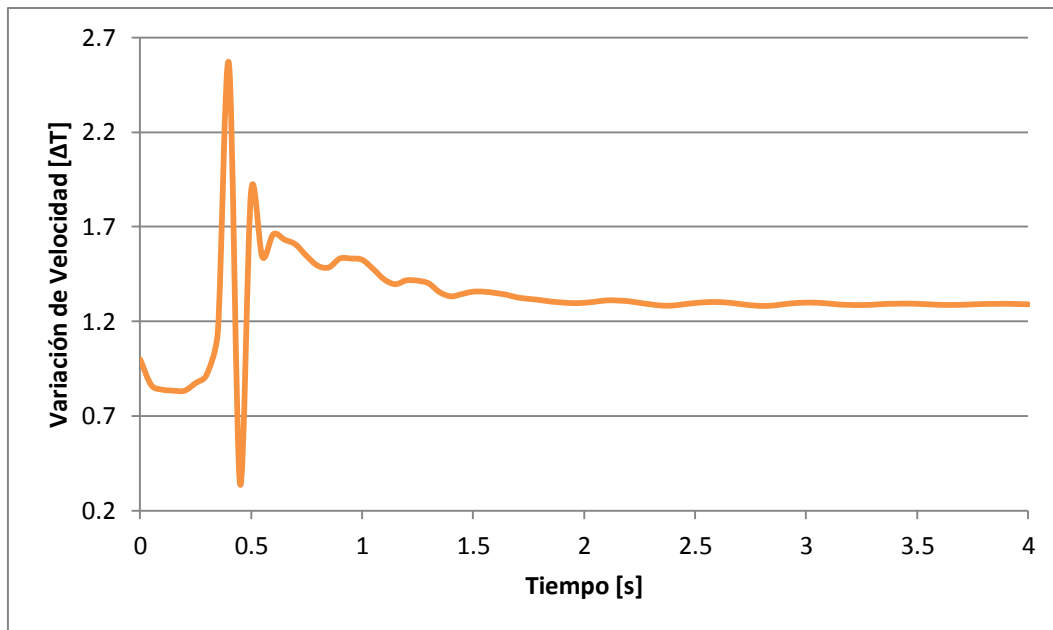
*Ilustración 11: Estabilización de Flujo para un punto al inicio (a), centro (b) y fina (c) del canal para el modelo de rugosidad Tipo C. 1ra prueba.*



(a)

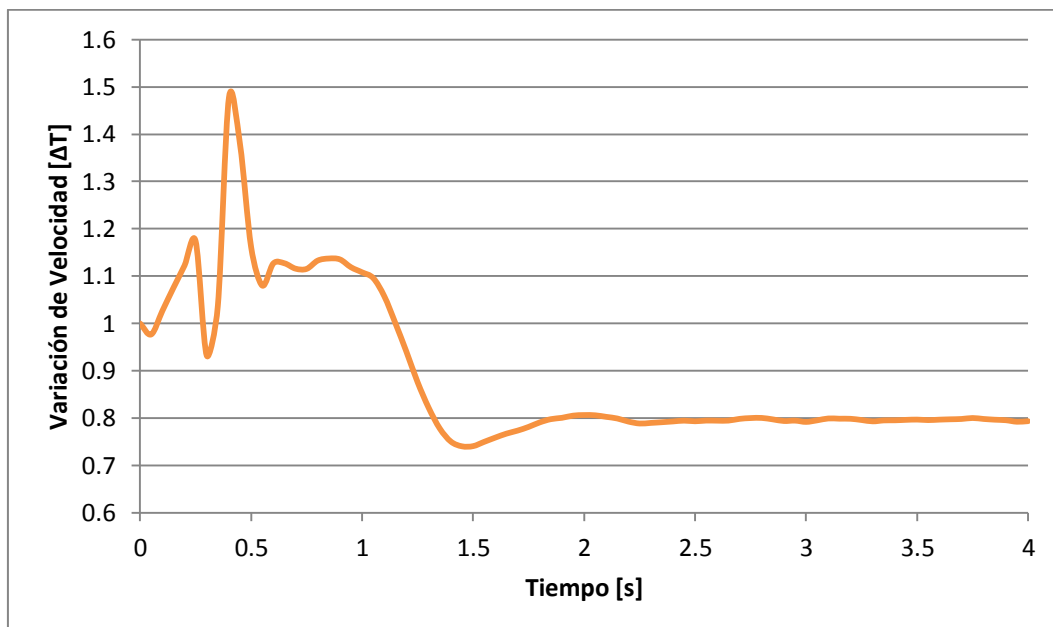


(b)

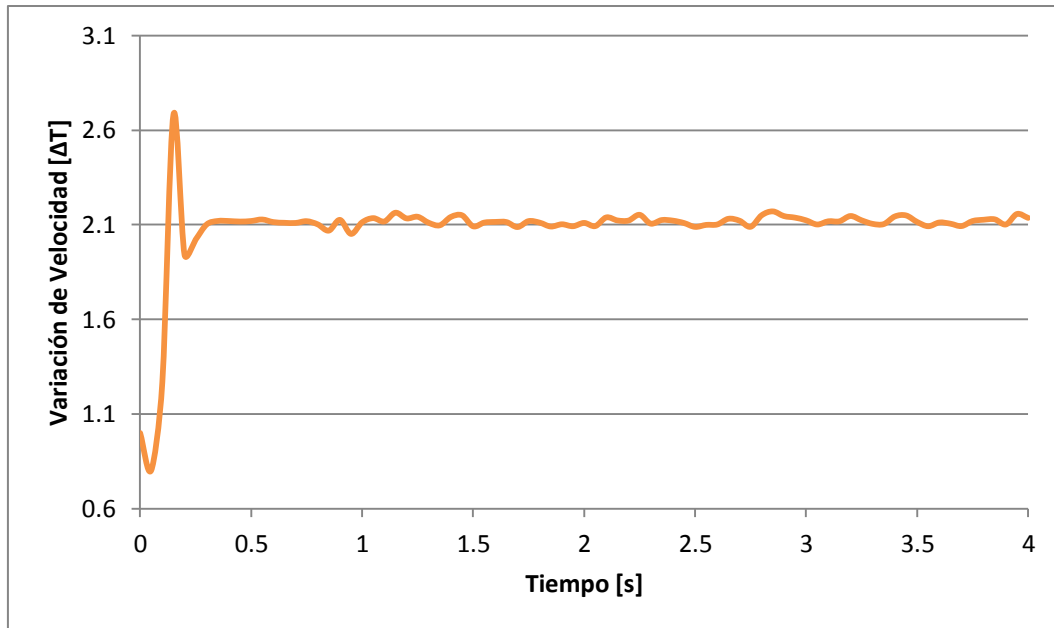


(c)

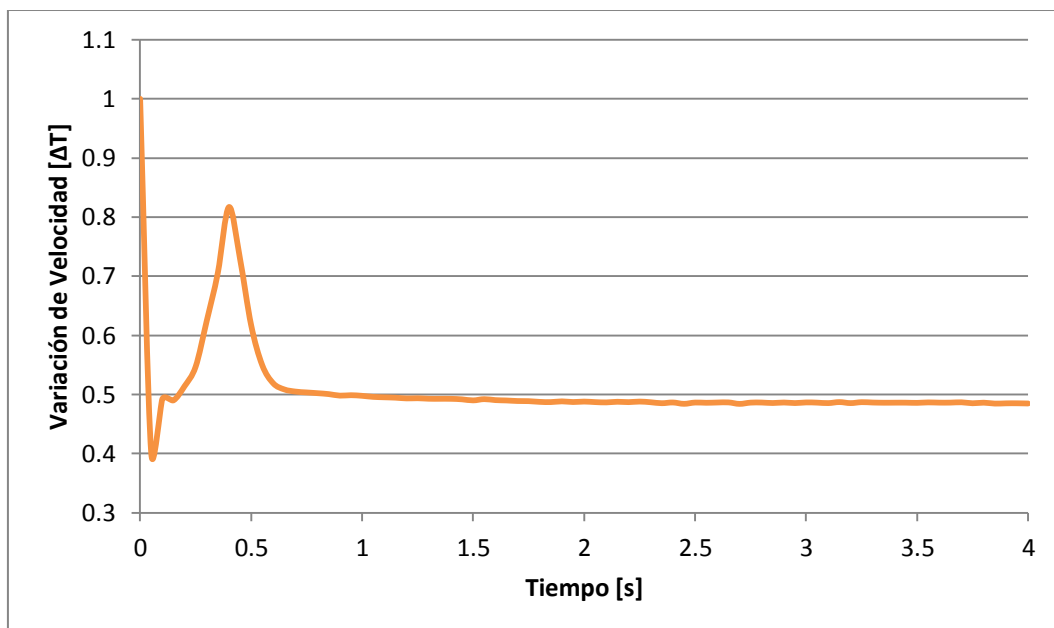
*Ilustración 12: Estabilización de Flujo para un punto al inicio (a), centro (b) y final (c) del canal para el modelo de rugosidad Tipo C. 2da prueba.*



(a)

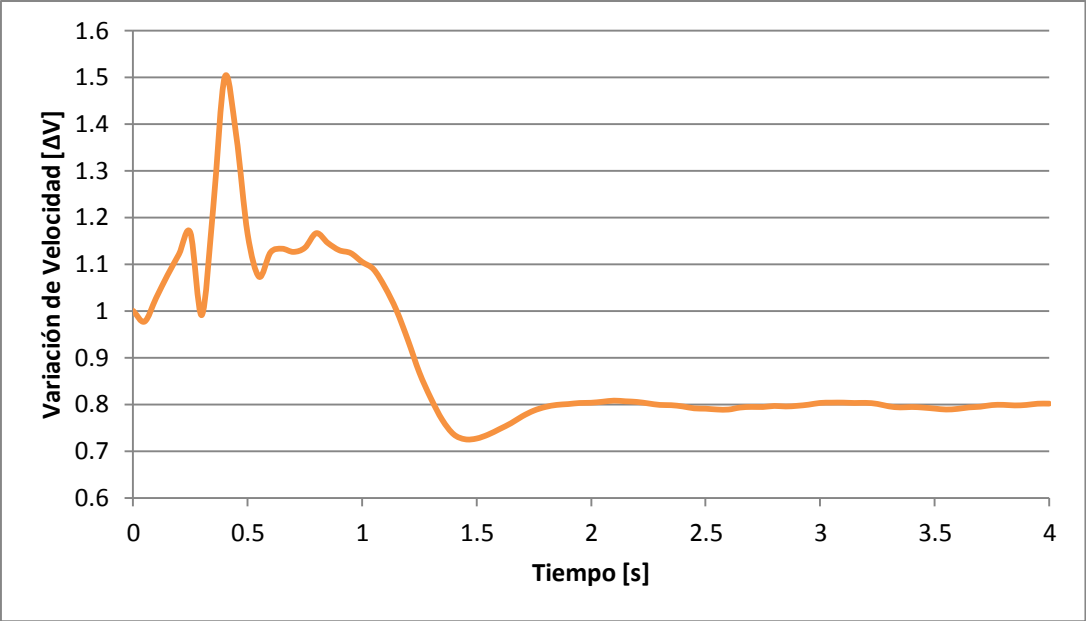


(b)

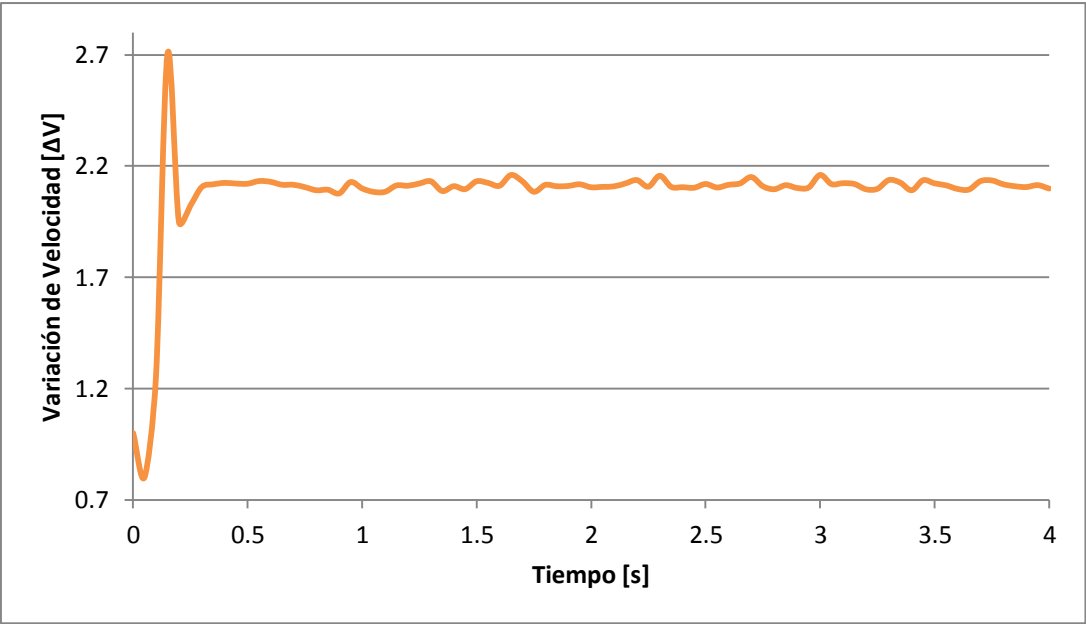


(c)

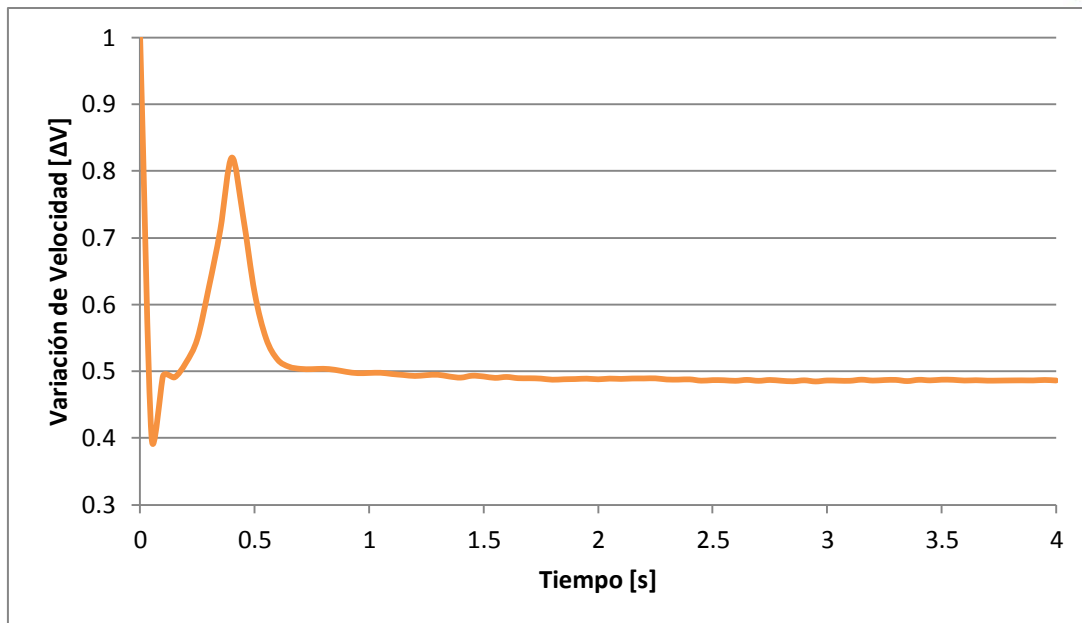
*Ilustración 13: Estabilización de flujo para un punto al inicio (a), centro (b) y final (c) del canal para el modelo RAM 1. 1ra prueba.*



(a)

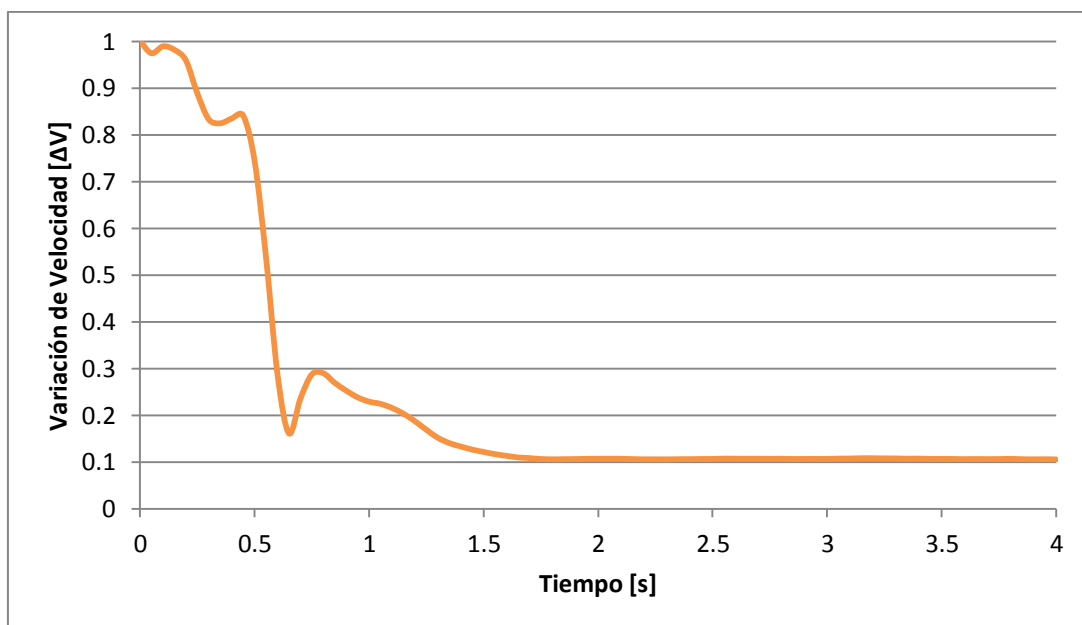


(b)

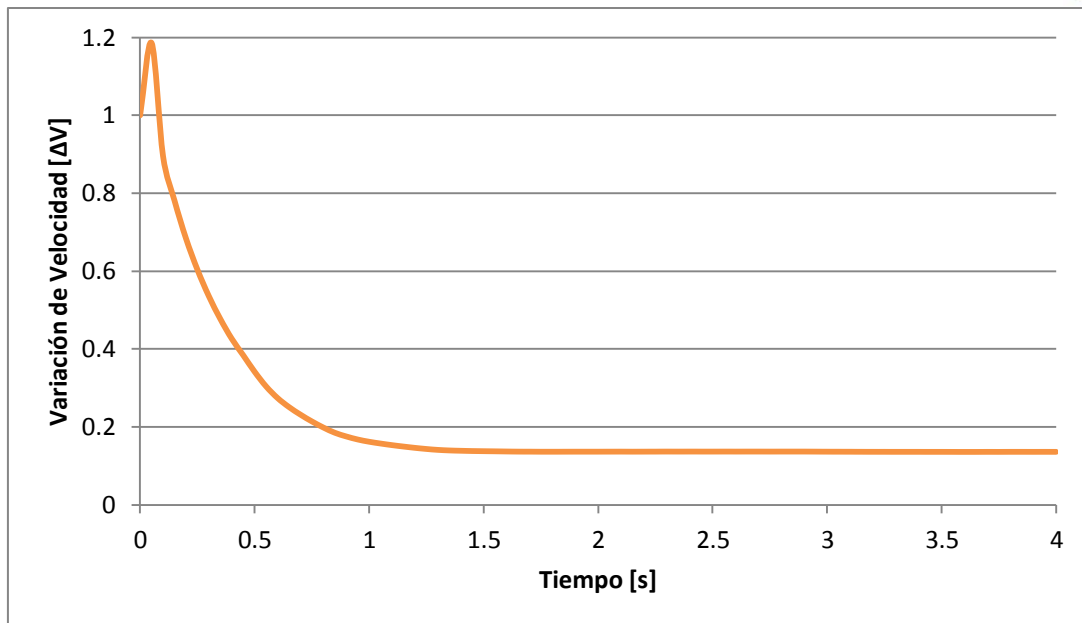


(c)

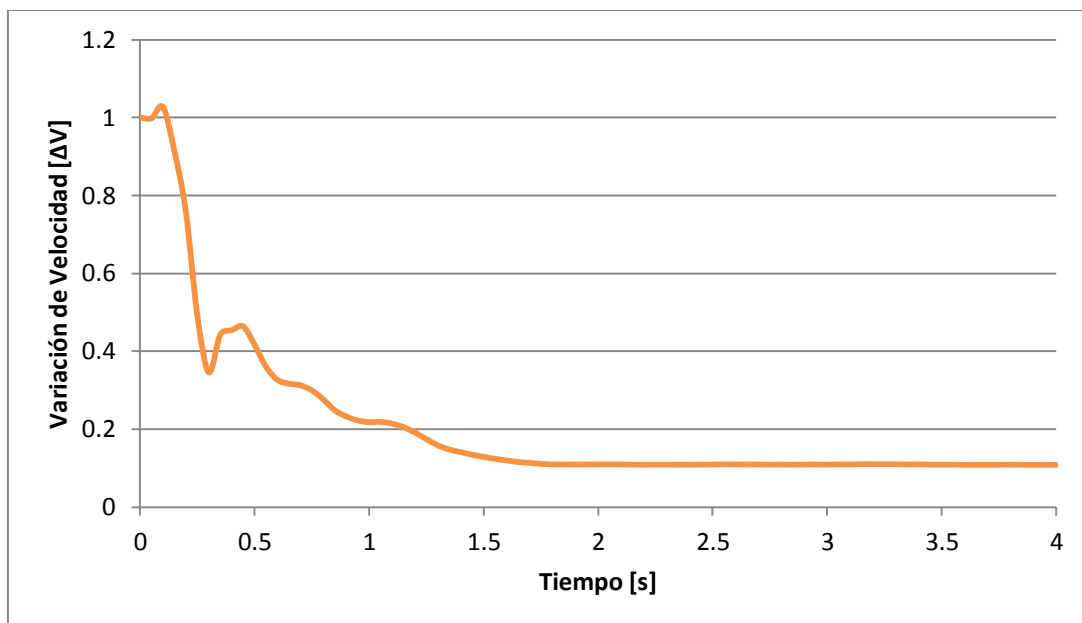
*Ilustración 14: Estabilización de flujo para un punto al inicio (a), centro (b) y final (c) del canal para el modelo RAM 1. 2da prueba.*



(a)



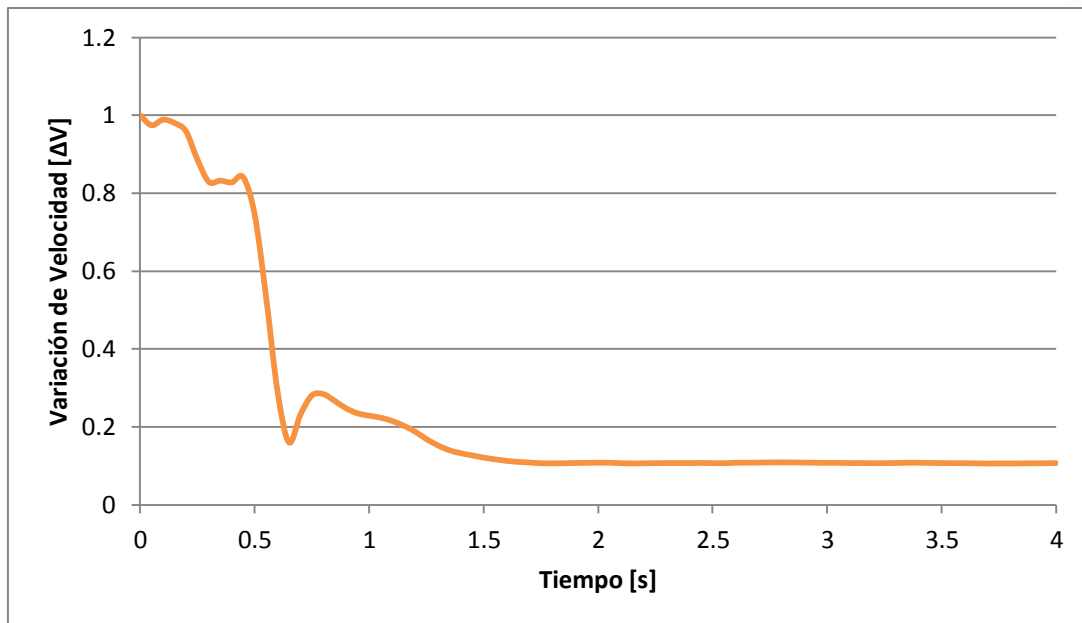
(b)



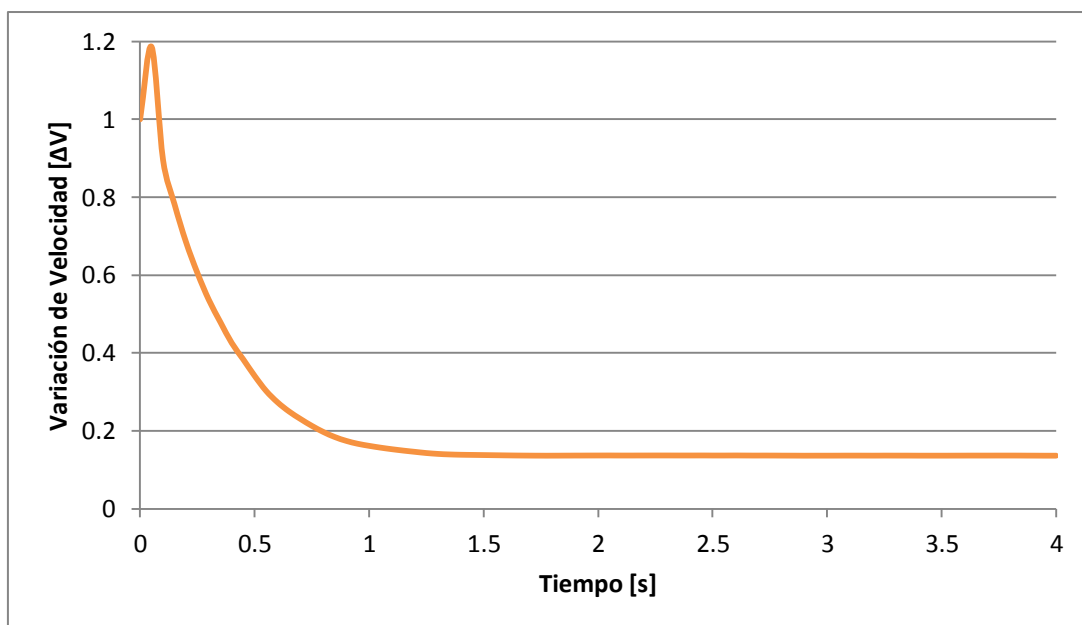
(c)

*Ilustración 15: Estabilización de flujo para un punto al inicio (a), centro (b) y final (c) del canal para el modelo RAM 2. 1ra prueba.*

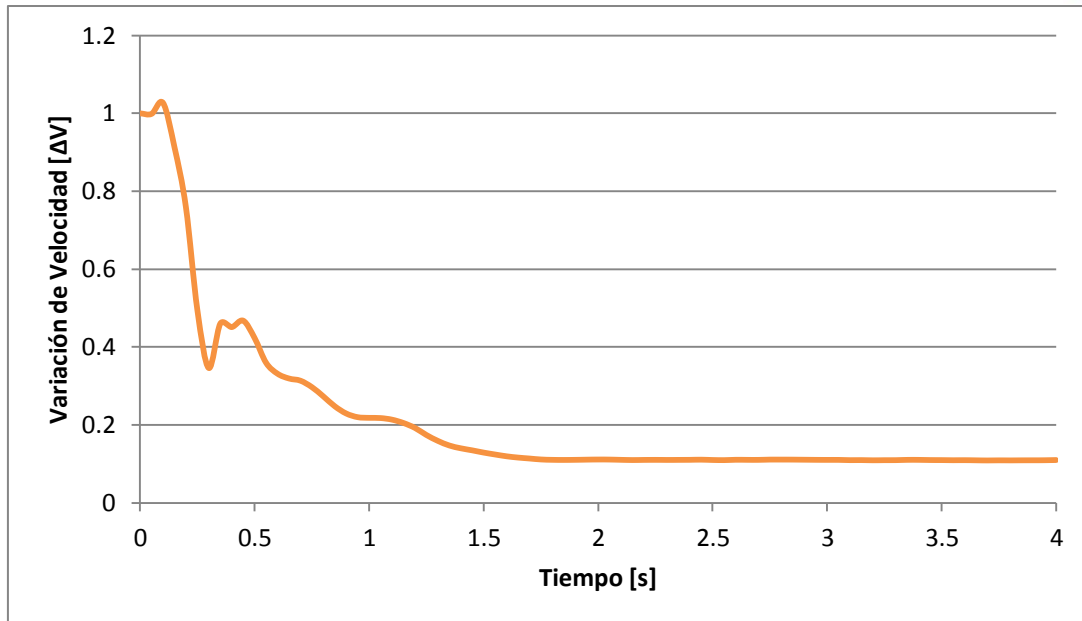




(a)



(b)



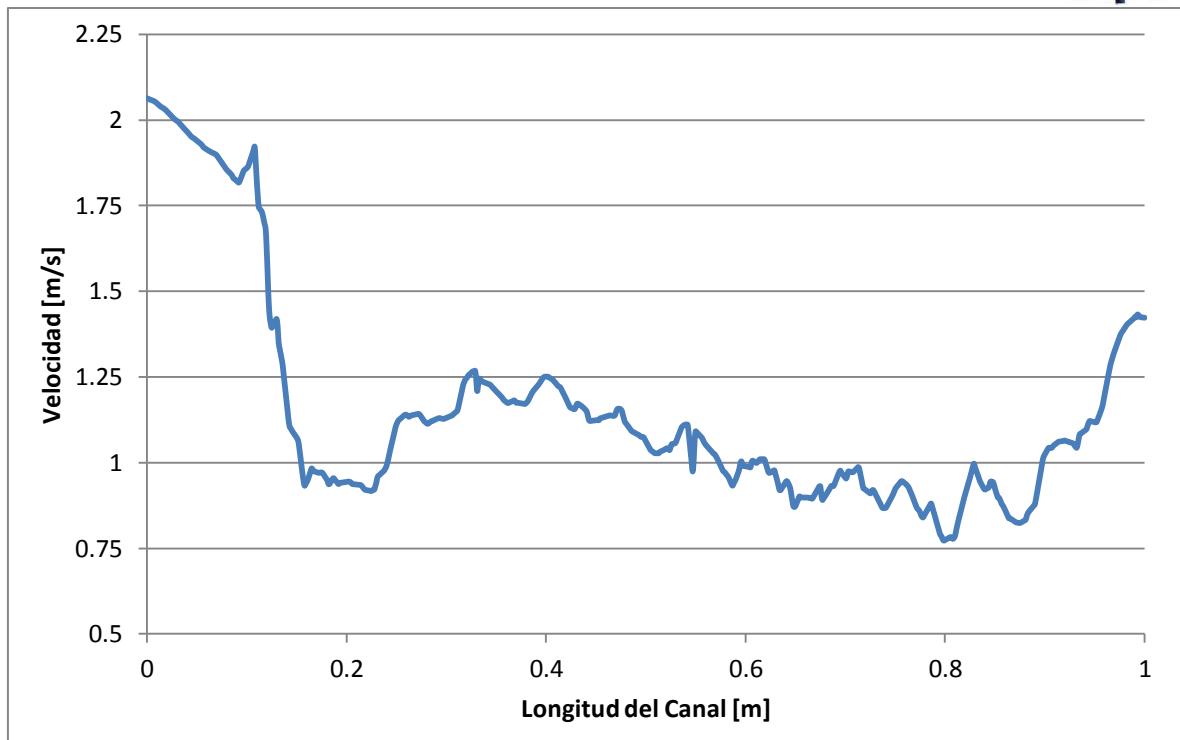
(c)

*Ilustración 16: Estabilización de flujo para un punto al inicio (a), centro (b) y final (c) del canal para el modelo RAM 2. 2da prueba.*

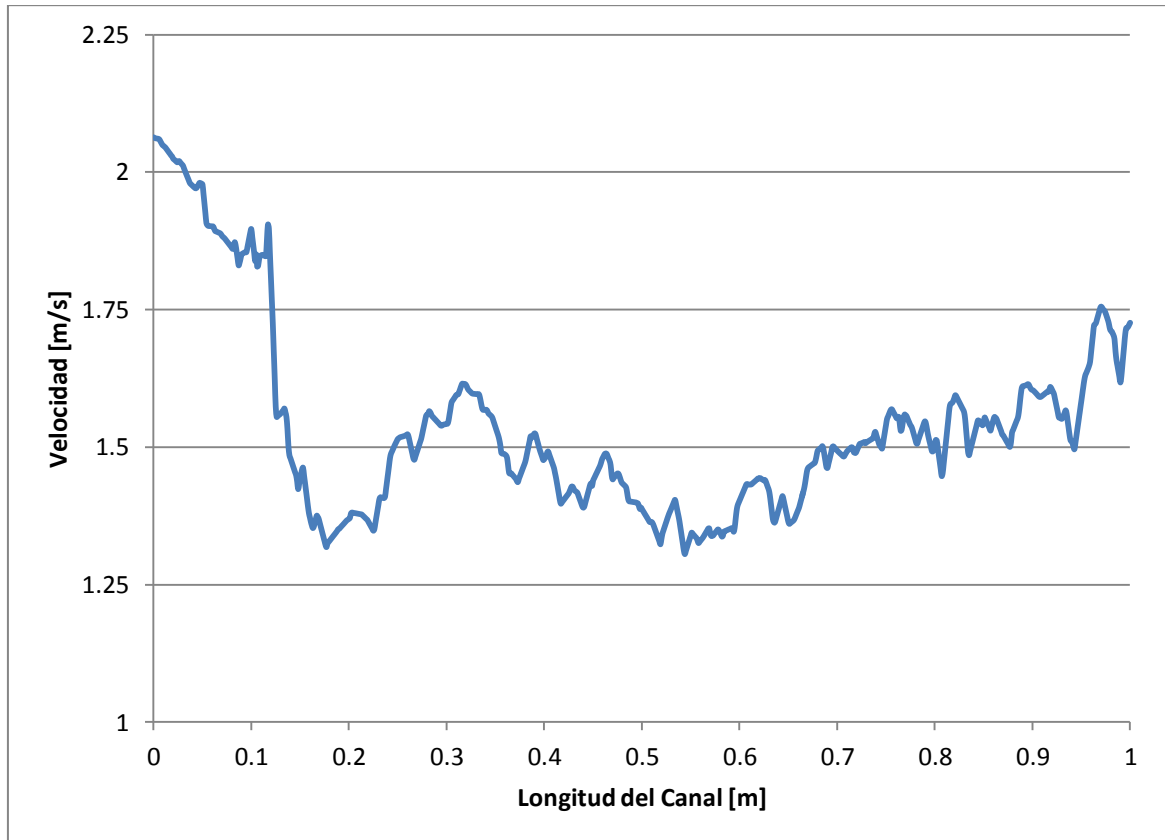
#### 4.3. Velocidad a lo largo del canal con rugosidad artificial.

Luego de que el flujo se ha estabilizado se determinó la velocidad que ocurre a lo largo del canal a una profundidad de 0.05 m desde el fondo, con el objetivo de establecer cuál es el modelo de rugosidad artificial que disipa mayor cantidad de energía y por tanto reduce más la velocidad dentro del canal.

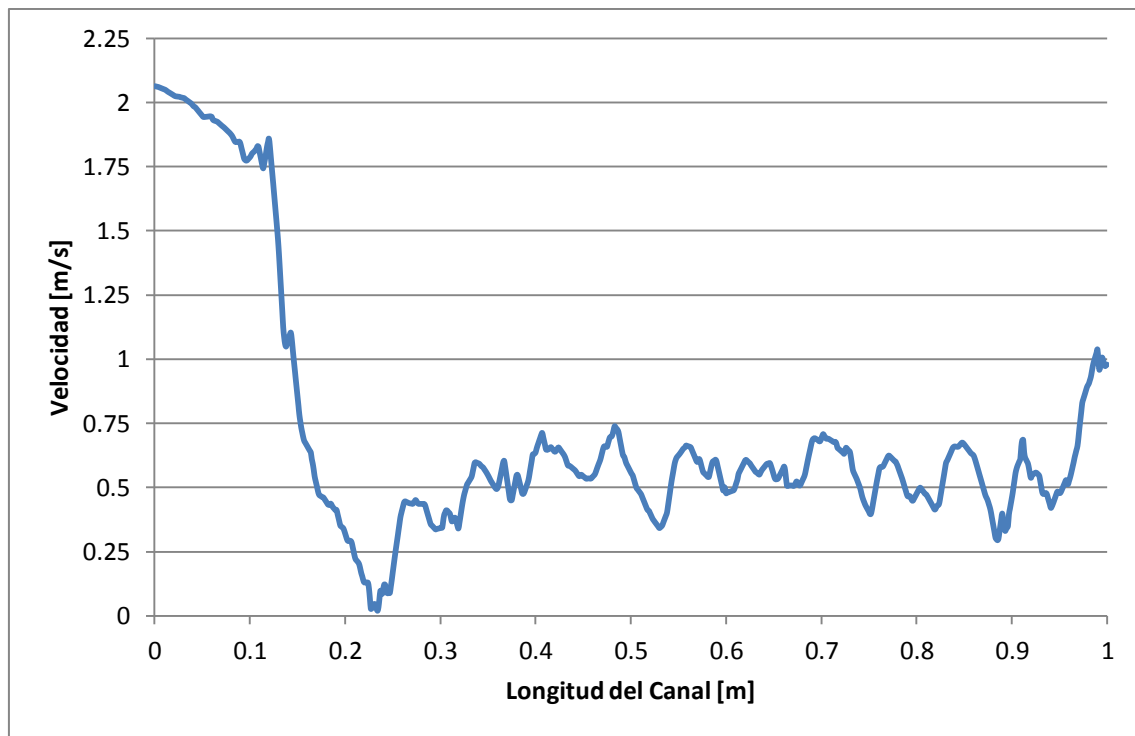
En las Ilustraciones Ilustración 17, Ilustración 18, Ilustración 19, se muestran las gráficas de variación de la velocidad a lo largo del canal determinadas a una profundidad de 0.05 m del fondo del canal, para las simulaciones con el caudal máximo (26l/s).



*Ilustración 17: Velocidad al final del canal con rugosidad Tipo C. Para el caudal máximo de 26L/s.*



*Ilustración 18: Velocidad al final de canal con RAM 1. Para el caudal máximo de 26L/s.*



*Ilustración 19: Velocidad al final del canal con RAM 2. Para el caudal máximo de 26L/s.*

De los resultados obtenidos se tiene que la reducción de velocidad (velocidad al inicio – velocidad al final) es del 41% para la rugosidad Tipo C, del 29% para RAM1, y del 60% para RAM2, resultando que el modelo de rugosidad artificial modificada 2, es el que disipa más energía y por tanto logra una disminución de la velocidad en el canal de una manera más efectiva que los otros modelos simulados.

Además se observa que, el modelo de rugosidad artificial modificada 1, en cambio, presenta una disminución de la efectividad con respecto al modelo de rugosidad Tipo C.

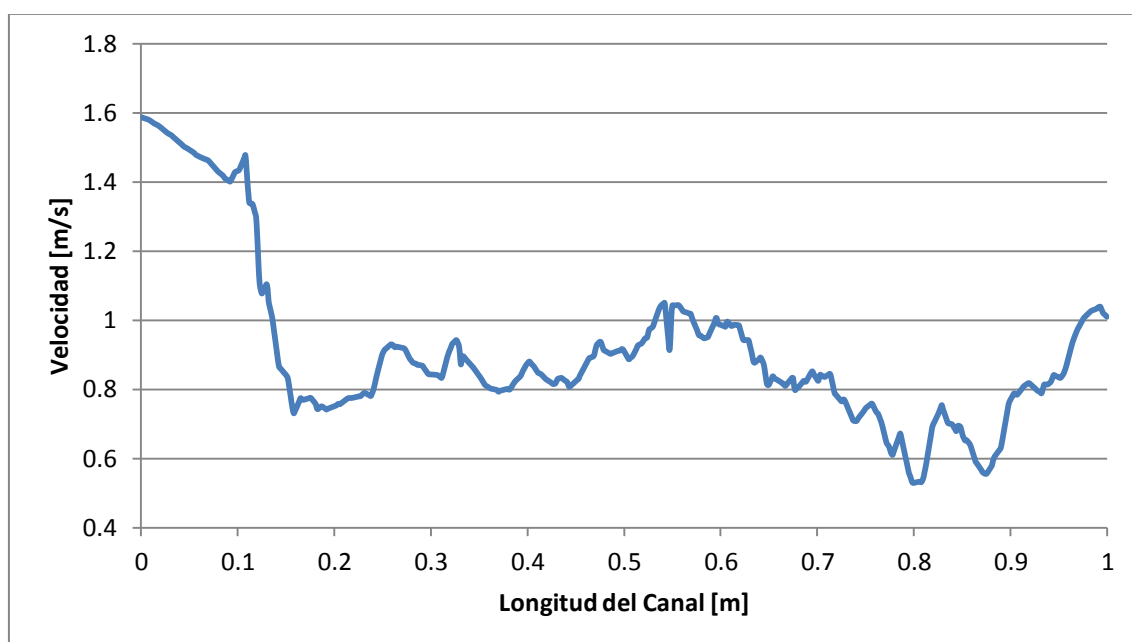
Finalmente se comparó los resultados obtenidos de las simulaciones con respecto al obtenido del diseño teórico del canal con rugosidad artificial con bloques Tipo C (ver Tabla 3). En la Tabla 7 se puede observar los resultados de velocidad de cada una de las simulaciones y la velocidad teórica.

<i>Tabla 7 Velocidad de Simulación vs Velocidad Teórica.</i>			
<i>Caudal de 26 L/s.</i>			
<b>Rugosidad</b>	<b>Cs</b>	<b>Ks</b>	<b>Velocidad</b>
Tipo C	0.5	0.0035	1.429
RAM 1	0.5	0.0035	1.726
RAM 2	0.5	0.0035	0.978
Teórica (Tipo C)	n/a	n/a	1.04

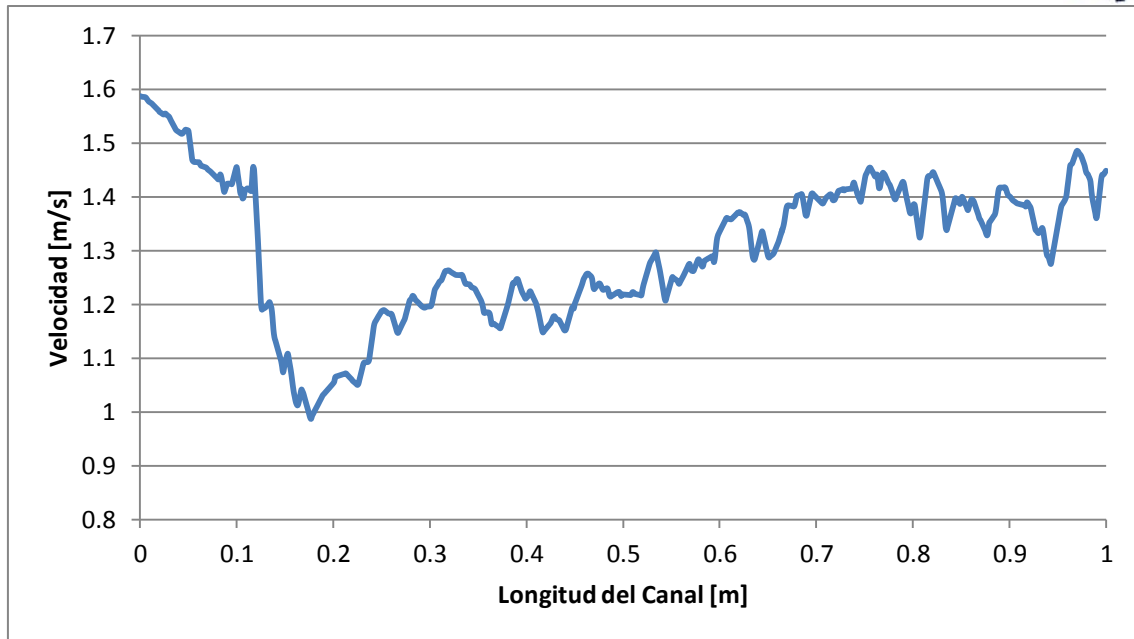
De manera similar, de las pruebas realizadas para el canal con un caudal de 20 L/s, se presentan en la Tabla 8 los resultados de las velocidades de cada modelo de rugosidad y se los compara con la velocidad teórica determinada en el análisis (ver Tabla 5).

<i>Tabla 8 Velocidad de Simulación vs Velocidad Teórica.</i> <i>Caudal de 20 L/s.</i>			
Rugosidad	Cs	Ks	Velocidad
Tipo C	0.5	0.0035	1.01
RAM 1	0.5	0.0035	1.45
RAM 2	0.5	0.0035	0.88
Teórica (Tipo C)	n/a	n/a	0.97

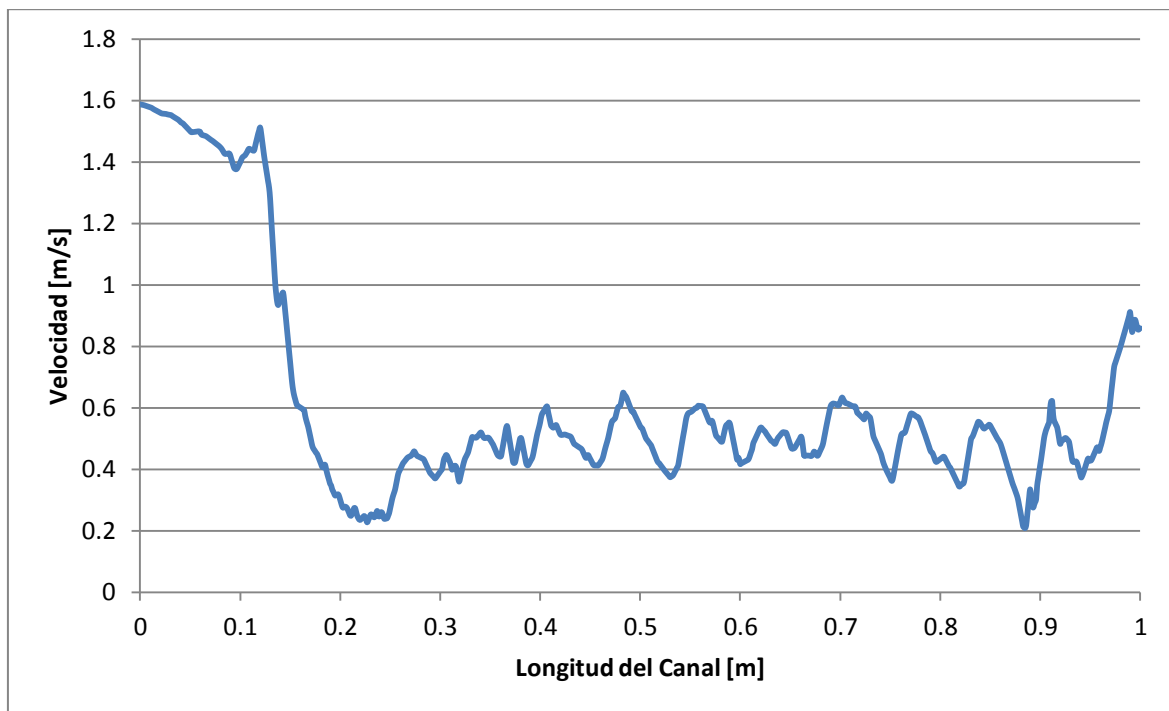
En las Ilustraciones de la 20 a la 22, se muestran las gráficas de variación de la velocidad a lo largo del canal determinadas a una profundidad de 0.05 m del fondo del canal, para las simulaciones realizadas con los diferentes tipos de bloques de rugosidad artificial y el caudal de 20 l/s.



*Ilustración 20: Velocidad para simulación con Rugosidad Tipo C, para un caudal 20 L/s.*



*Ilustración 21: Velocidad para simulación con RAM 1, para un caudal 20 L/s.*



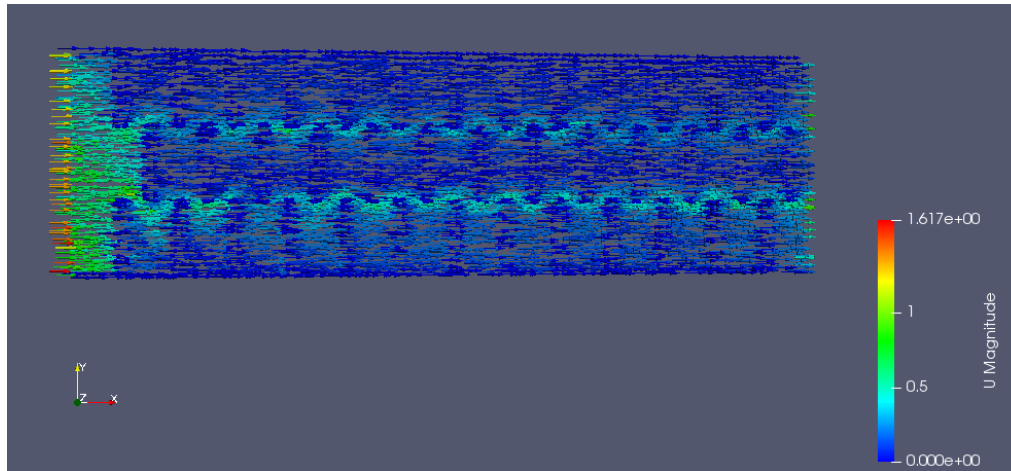
*Ilustración 22: Velocidad media para simulación con RAM 2, para un caudal 20 L/s.*

Nuevamente se determinó que el modelo de rugosidad que más energía disipa es el modelo de rugosidad artificial modificada 2 (RAM2), mostrado en la Tabla 8, pues se tiene una velocidad de 0.88 m/s. Para este caso la velocidad teórica determinada para los bloques de rugosidad Tipo C, se asemeja bastante a la velocidad obtenida para la simulación del canal con el mismo tipo de rugosidad.

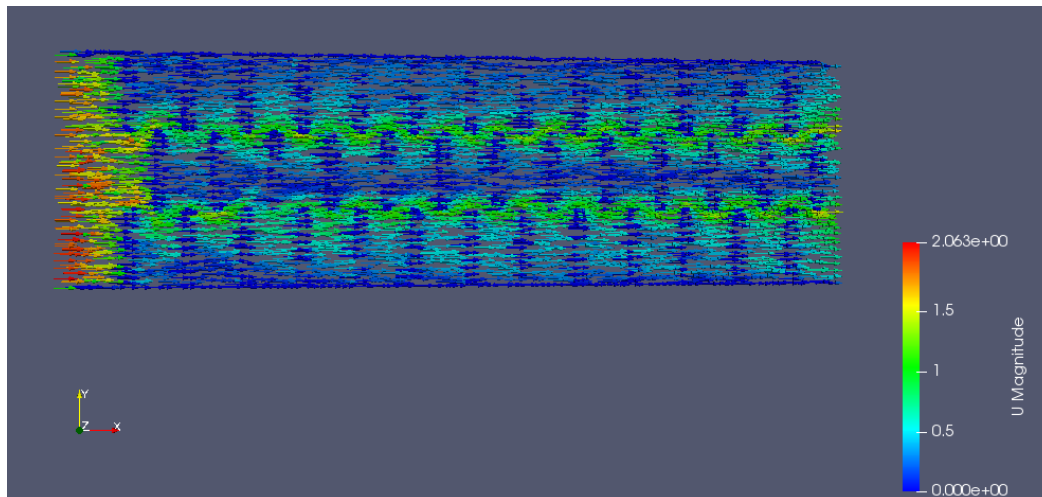
#### 4.4. Vectores de Velocidad.

Para obtener una visión más clara del flujo en un canal con elementos de rugosidad artificial, se determinaron los campos de vectores de velocidad a profundidades características del dominio, que corresponden al fondo del canal, en el nivel donde terminan los bloques de rugosidad artificial, en la mitad de la profundidad total del flujo, y en el nivel de la superficie libre respectivamente para los tres casos simulados.

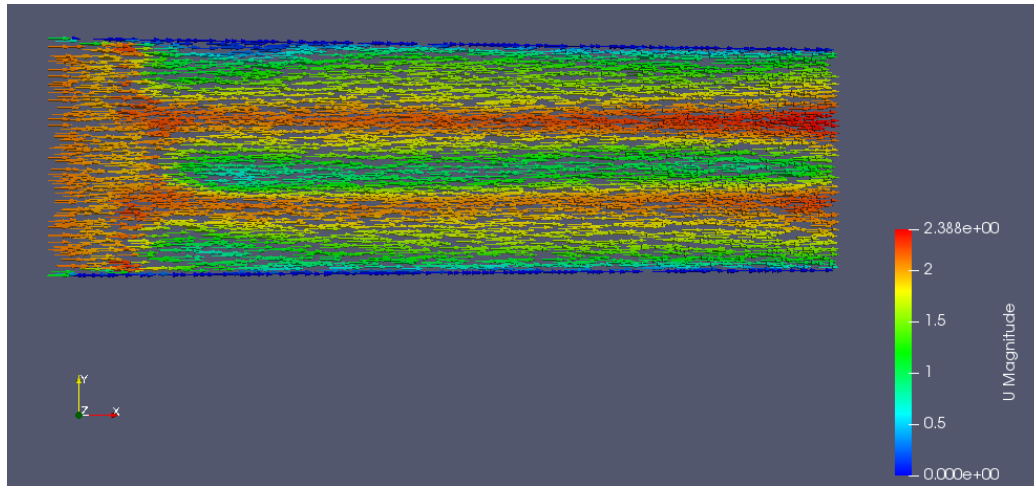
##### 4.4.1. Para el modelo con Rugosidad Tipo C.



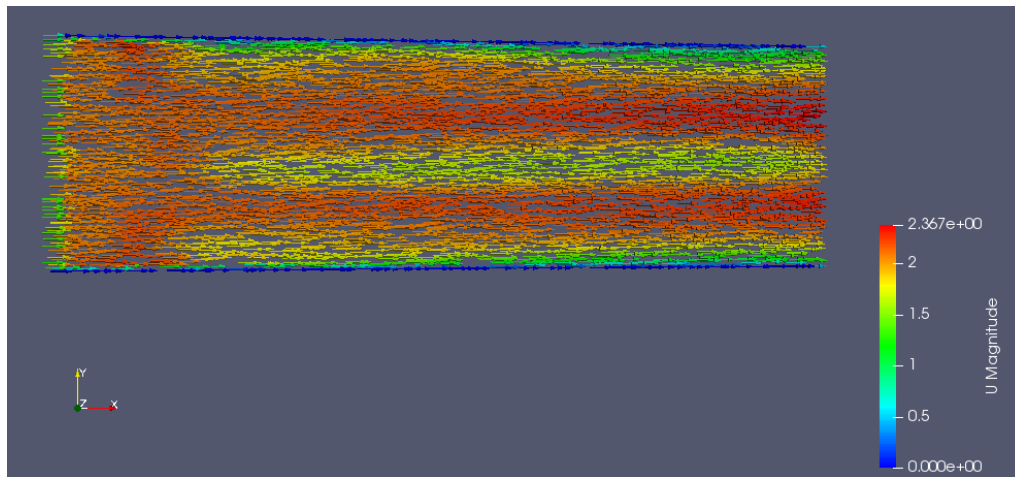
(a)



(b)



(c)



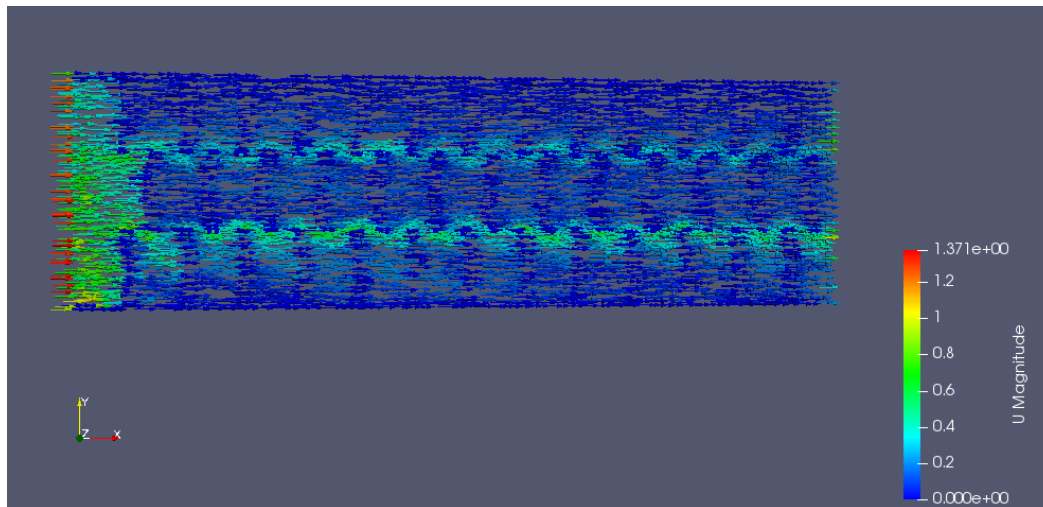
(d)

*Ilustración 23: Vectores de velocidad para el modelo de rugosidad Tipo C. Al fondo (a), a la altura de los bloques (b), a la mitad de la altura de flujo (c), y en la superficie (d).*

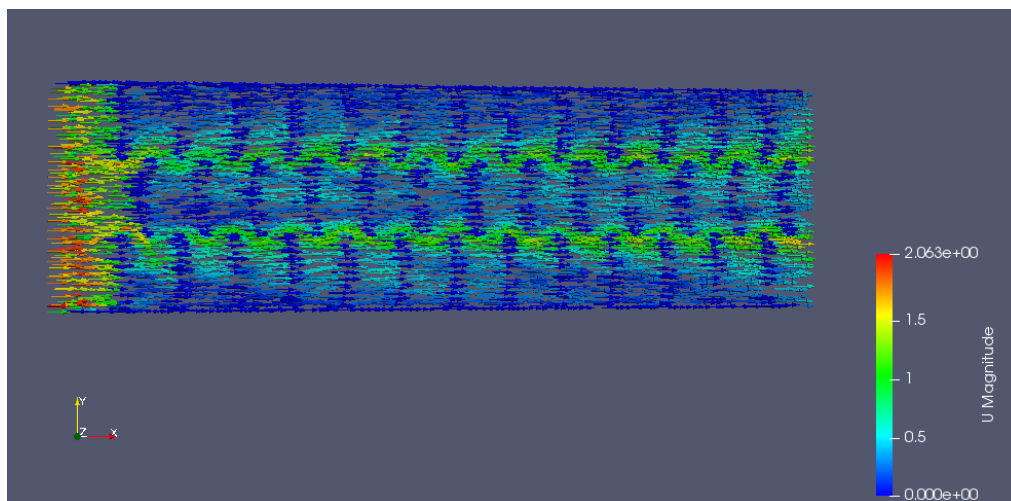
Tal como se puede observar, la efectividad en la reducción de velocidad depende de la altura a la que se considere la velocidad, a medida de que aumenta la profundidad, los bloques de rugosidad pierden su efecto y llegamos a observar que en la superficie libre se tienen a la salida del canal valores de velocidad elevados, muy cercanos a los de la velocidad de entrada, o incluso se podría presumir que mayores (según se observa en el gráfico).



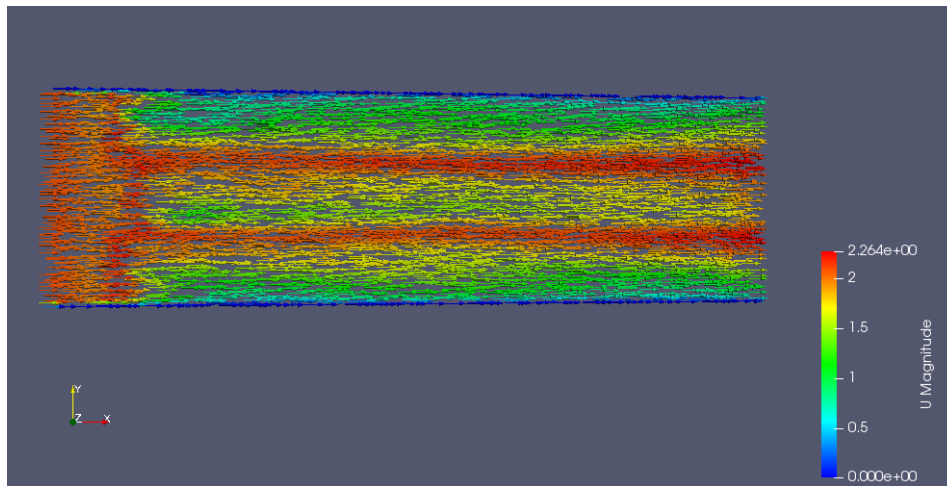
**4.4.2. Para el modelo con RAM 1:**



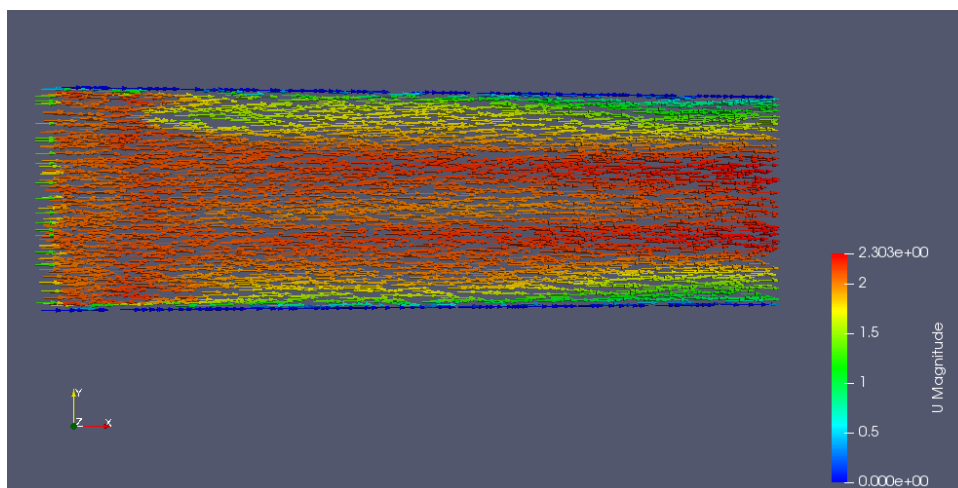
(a)



(b)



(c)

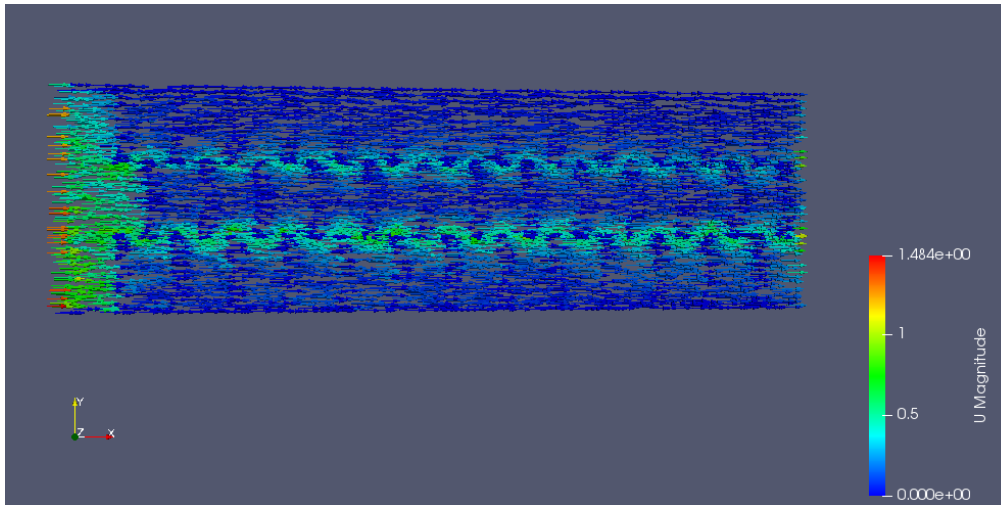


(d)

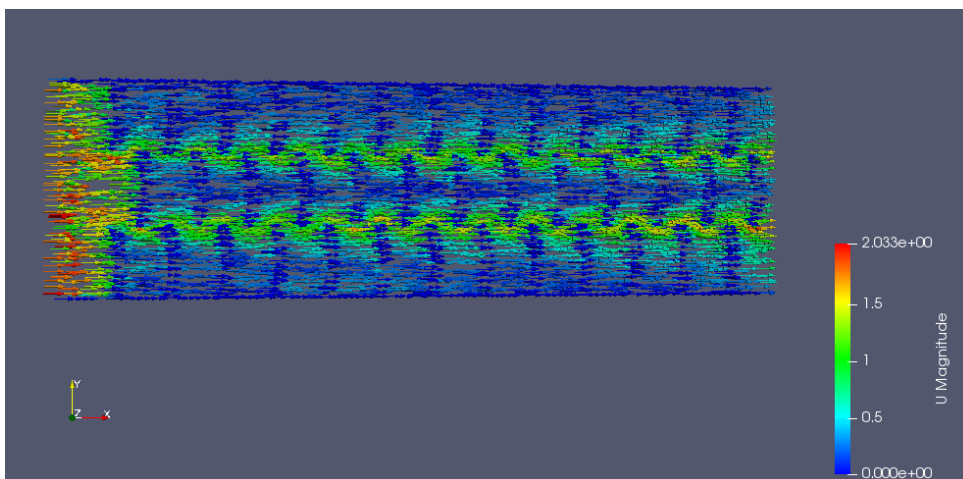
*Ilustración 24: Vectores de velocidad para el modelo de rugosidad RAM1. Al fondo (a), a la altura de los bloques (b), a la mitad de la altura de flujo (c), y en la superficie (d).*

El mismo patrón de comportamiento se observa para el caso de la RAM1 para profundidades de flujo pequeñas se observa mayor efecto de los bloques de rugosidad.

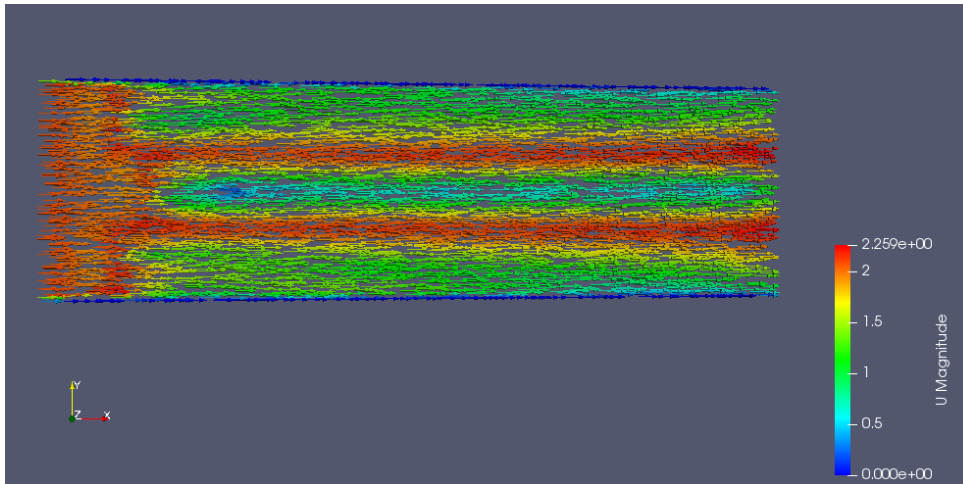
**4.4.3. Para el modelo con RAM 2.**



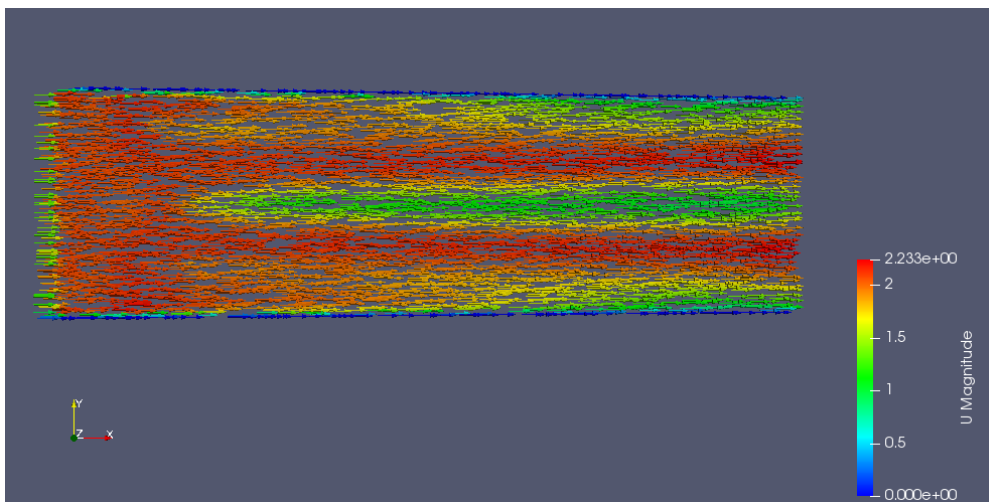
(a)



(b)



(c)



(d)

*Ilustración 25: Vectores de velocidad para el modelo de rugosidad RAM2. Al fondo (a), a la altura de los bloques (b), a la mitad de la altura de flujo (c), y en la superficie (d).*

El mismo patrón de comportamiento se observa para el caso de la RAM2 para profundidades de flujo pequeñas se observa mayor efecto de los bloques de rugosidad.

De las Ilustraciones Ilustración 23, Ilustración 24 y Ilustración 25 mostradas anteriormente, se puede observar que para el modelo RAM 2 se tiene una velocidad superficial máxima menor a los otros dos modelos, siendo esta de 2.23 m/s. Mientras que para los modelos Tipo C y RAM 1, se tienen velocidades de 2.36 y 2.30 m/s respectivamente.



## 5. Conclusiones y Recomendaciones

Dentro del estudio realizado se planteó como objetivo el de realizar una simulación numérica de un canal de alta pendiente con rugosidad artificial, utilizando un modelo de rugosidad de los que existen propuestos en la literatura, así como también de dos modelos adicionales que permitan una mayor efectividad en la reducción de la velocidad, con el objetivo de analizar el comportamiento del flujo y de determinar la efectividad de cada uno de ellos en la reducción de la velocidad de flujo.

Se tienen por tanto las siguientes conclusiones sobre el trabajo realizado.

- El tiempo total de simulación empleado fue de 4 segundos, ya que se determinó mediante simulaciones preliminares que en este tiempo se alcanzaba la convergencia de las variables especialmente de la velocidad que es el parámetro de comparación y análisis del presente estudio.
- De los tres modelos de rugosidad que se utilizaron para las simulaciones, se determinó que aquel que se compone de arcos de circunferencia con su parte cóncava hacia aguas arriba (RAM 2), es el que presenta mayor eficiencia, cuando se compara con la velocidad simulada a una profundidad de 0.05 m desde el fondo del canal en el punto medio de la sección transversal, siendo este el que produce una reducción mayor de la velocidad del orden del 60 % en el flujo con respecto a los otros modelos probados que reducen la velocidad en porcentajes menores de 41% para el tipo C y 29% para RAM1.
- Un punto muy importante a considerar, es que los valores teóricos son promedios de toda la sección, es decir se tiene un solo valor de velocidad en la sección transversal y a lo largo de toda la longitud del canal, mientras que la simulación numérica da valores detallados de la velocidad y resulta incierta la comparación con un solo valor.
- Para la simulación realizada con el caudal máximo (26 L/s), se tiene que para el canal con el modelo RAM 2 se tiene una velocidad final de 1.004 m/s la cual es menor a la velocidad del modelo con rugosidad Tipo C en un 30%.  
Mientras que para un caudal de 20 L/S se tiene que la velocidad del modelo RAM 2 es menor a la del modelo con rugosidad Tipo C en un 14%.
- El modelo de rugosidad RAM 1 resultó ser menos efectivo que el modelo de rugosidad Tipo C (barrotes cortados), esto puede deberse a la configuración de los bloques que al estar intercalados pueden provocar una reducción menor de la velocidad con respecto al modelo Tipo C. La velocidad del modelo es de 1.72 m/s que es 18.6% mayor que la velocidad del modelo de rugosidad Tipo C.
- Observando los vectores de velocidad se determinó que el flujo tiene mayor velocidad en los bordes de los bloques de rugosidad para los tres modelos, además conforme la altura de flujo aumenta, la velocidad también lo hace. Por tanto mientras mayor sea la altura del flujo, menos efectivos resultan los bloques de rugosidad.
- Para el modelo de Rugosidad Artificial Modificada 2, se tiene una velocidad superficial menor que para los otros modelos con una diferencia del 5%. Comprobando que este modelo es el que más energía disipa.



Se ha realizado una primera aproximación a la simulación numérica de canales abiertos con rugosidad artificial, de los resultados obtenidos y el análisis realizado, se pueden realizar las siguientes recomendaciones.

Para las simulaciones correspondientes a la rugosidad Tipo C que existe disponible información para su respectiva comparación, se establece que para el caudal máximo las simulaciones no replican los valores esperados mediante la teoría, en el caso del caudal de 20 l/s se tiene una mayor similitud entre las simulaciones y los valores teóricos. Puesto que en el presente trabajo se consideran solo dos caudales y una relación de  $h/k = 3$ , se recomienda realizar un análisis más detallado que permita validar o rechazar las ecuaciones propuestas en la teoría. Se recomienda realizar simulaciones utilizando una variación de pendientes desde el 10% al 25% realizando los ajustes necesarios a las dimensiones de los bloques de rugosidad y de esta manera considerar el estado más desfavorable, determinar para qué relación  $h/k$  se tienen los bloques más grandes o más pequeños y si estas dimensiones son representativas o no dentro del canal, es decir si tienen efecto o no en el cambio de las condiciones del flujo.

De la misma manera, para la consideración de una forma de rugosidad artificial nueva, se ha realizado una primera aproximación de determinación de su eficiencia, pero esta corresponde a dos valores de caudales, una sola pendiente y una relación  $h/k$ , para determinar la eficiencia de esta nueva forma, de manera más concisa se deben realizar simulaciones o ensayos con una mayor variación de los parámetros. Al igual que para el modelo de rugosidad tipo C, se recomienda realizar mayores ensayos con una variación de la pendiente desde el 10% al 25%, variar los caudales de circulación, variaciones de la relación  $h/k$  de 3 a 8 según los ábacos mostrados en literatura; y variaciones en el radio de los arcos de circunferencia que componen a los bloques, teniendo así muchas más variables para poder determinar un modelo de bloque que presente una mayor eficiencia.





## 6. Referencias Bibliográficas.

- [Anchenson, 1990] Anchenson, D. (1990). *Elementary Fluid Mechanics*. Oxford Applied Mathematics and Computing Science Series.
- [Anonymous, 2013] Anonymous (2013). Efecto de la pendiente en la distribución de presiones. *Ingeniería Civil*. <http://www.ingenierocivilinfo.com/2010/02/efecto-de-la-pendiente-en-la.html>.
- [Carrillo, 2018] Carrillo, Verónica; Pacheco, E. (2018). Application of openfoam solver settlingfoam to bedload sediment transport analysis. *DYNA*, 85(206):121–127.
- [Chaudhry, 2008] Chaudhry, M. H. (2008). *Open-Channel Flow*. Springer.
- [Chow, 1994] Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. McGraw Hill.
- [English, 2017] English, T. (2017). A look at the history of computational fluid dynamics. *The short sleeve and tie club*. <http://shortsleeveandtieclub.com/a-look-at-the-history-of-computational-fluid-dynamics/>.
- [Greenshields, 2018] Greenshields, C. (2018). *OpenFOAM User Guide*. The OpenFOAM Fundation.
- [Guzmán, 2015] Guzmán, A. (2015). La modelación física y numérica son herramientas claves en la optimización de los diseños hidráulicos. *UDEP Hoy*. <http://udep.edu.pe/hoy/2015/la-modelacion-fisica-y-numerica-son-herramientas-claves-en-la-optimizacion-de-los-disenos-hidraulicos/>.
- [Hidalgo, 2001] Hidalgo, B. (2001). El "aspect ratio" en el método de los elementos finitos. [http://www.iberisa.com/soporte/femap/aspect\\_ratio.htm](http://www.iberisa.com/soporte/femap/aspect_ratio.htm).
- [Hirt, 1981] Hirt, C; Nichols, B. (1981). Volumen of fluid /vof/ method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39:201–225.
- [Johnson, 1944] Johnson, J. W. (1944). Rectangular artificial roughness in open channels. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 25(6):906–914.
- [Kawaguti, 1953] Kawaguti, M. (1953). Numerical solution of the navier-stokes equations for the flow around a circular cylinder at reynolds number 40. *Journal of the Physical Society of Japan*. <https://journals.jps.jp/doi/10.1143/JPSJ.8.747>.
- [Knight and Macdonald, 1979] Knight, D. and Macdonald, A. (1979). Open channel flow with varying bed roughness. *Journal of the Hydraulics Division*, 105(9):1167–1183.
- [Krochin, 1982] Krochin, S. (1982). *Diseño Hidráulico*. Segunda edition.
- [Min, 2017] Min, A. (2017). Modelos de turbulencia en cfd. *Naviers.XYZ Mecánica de Fluidos*. <https://naviers.xyz/dinamica-de-fluidos-computacional/modelos-de-turbulencia-en-cfd/>.
- [Mostkov, 1954] Mostkov, M. A. (1954). *Hydraulic Handbook [In Russian]*. Gosstroizdat.
- [Nguyen, 2004] Nguyen, Van Thinh ; Nestman, F. (2004). Applications of cfd in hydraulics and river engineering. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 18(2):165–174.
- [Peng, 1996] Peng, Shia-Hui; Davidson, L. H. S. (1996). The two- equations turbulence k - omega model applied to recirculating ventilation flows. Technical Report 96, Charlmer University of Technology.



[Robinson and Albertson, 1952] Robinson, A. and Albertson, M. (1952). Artificial roughness standard for open channels. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 33(6):881–888.

[Rojas, 2013] Rojas, H. (2013). Diseño de canales. In *Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil*, pages 51–54. <https://www.slideshare.net/linoolascuagacruzado/diseo-de-canales>.

[Salaheldin, 2000] Salaheldin, Tarek; Imran, J. C. H. (2000). Simulación de flujos en canales abiertos con pendientes fuertes. *Ingeniería del Agua*, 7(4):391–408.

[Thom, 1933] Thom, A. (1933). The flow past circular cylinders at low speeds. *The Royal Society Publishing*, 141:651 – 666.

[Valero, 2015] Valero, D. (2015). Modelación hidráulica de flujos multifase de grandes presas. Master's thesis, Universidad Politécnica de Valencia. <https://riunet.upv.es/handle/10251/52654>.

[Vasquez, 2013] Vasquez, K. (2013). Ventajas y desventajas de la simulación por computadora.

[Vazquez, 2004] Vazquez, J. L. (2004). La ecuación de navier stokes. un reto físico - matemático para el siglo xxi. *Monografías de la Real Academia de Ciencias de Zaragoza*.

[Wilcox, 2008] Wilcox, D. (2008). Formulation of the k- ( $\omega$ ) turbulence model revisited. *AIAA Journal*.



## Anexo 1

### Pruebas de Calibración y configuración del modelo numérico para la simulación.

Para las 20 pruebas realizadas en el canal base, sin los bloques de rugosidad artificial, se varió el valor para el coeficiente de rugosidad absoluta  $K_s$ , el cual se especifica dentro del archivo *nut* (ver Tabla 1. 5 más adelante), y se realizó la medición de la velocidad media en el final del canal. Se varió el coeficiente de rugosidad absoluta hasta determinar aquel que proporcione condiciones de calado y velocidad iguales a las medidas en el laboratorio.

*Tabla 1. 1: Plan de pruebas para calibración.*

Prueba	Cs	Ks	Velocidad [m/s]
1	0.5	0.026	2.583
2	0.5	0.00026	2.576
3	0.5	0.0003	2.573
4	0.5	0.0003	2.571
5	0.5	0.0005	2.554
6	0.5	0.001	2.531
7	0.5	0.002	2.487
8	0.5	0.0021	2.482
9	0.5	0.0025	2.466
10	0.5	0.0028	2.455
11	0.5	0.0029	2.452
12	0.5	0.003	2.448
13	0.5	0.0031	2.445
14	0.5	0.0032	2.442
15	0.5	0.0033	2.437
16	0.5	0.0034	2.433
17	0.5	0.0035	2.43
18	0.5	0.0036	2.426
19	0.5	0.0037	2.423
20	0.5	0.0038	2.419

### Exportar la malla a un formato compatible con openFoam desde Salome-Meca.

- Una vez creada la malla (Mesh), se la debe exportar como formato *.unv* dentro de la carpeta donde se realizará la simulación.
- Abrir el terminal y direccionar la carpeta del caso de estudio.
- Una vez dentro de la carpeta del caso de estudio se escribe el comando: `ideasUnvToFoam <nombre de la malla.unv>`
- La generación de los parches o partes del mallado es un proceso automático luego de insertar el comando indicado en el paso anterior. Las características de la malla se



encuentran dentro de una carpeta llamada polyMesh, también generada automáticamente. En esta carpeta se crean varios archivos en donde se tienen los puntos, caras, y se asigna a cada parte de la malla una característica por defecto “patch” el cual se puede cambiar de acuerdo a la función que tenga cada parte como muro, atmósfera, entrada o salida.

### Configuración del modelo numérico para la simulación.

Dentro del paquete computacional openFoam se encuentran varios casos base de diferentes modelos, con el fin de ayudar al usuario a familiarizarse con el uso del software. Para el caso particular de este estudio se ha optado por tomar como referencia el caso “WaterChannel” ubicado en la carpeta Tutoriales de openFoam, para un flujo multifásico de nombre interFoam. Este caso de estudio trabaja con flujos bajo el modelo de turbulencia k-omega. Para la configuración del modelo se utilizó la guía del manual de usuario de OpenFoam.

Para realizar una simulación dentro del programa de openFoam es necesario crear tres directorios principales, en los cuales se almacena la información necesaria para poder realizar la simulación y llegar a una solución.

- Directorio 0: En este directorio se crean los archivos correspondientes a las condiciones iniciales del proyecto, se define el caudal, la velocidad, la presión, la rugosidad, la energía turbulenta, entre otras variables. Todos estos valores son definidos para el tiempo ( $t=0$ ), de ahí el nombre del directorio.
- Directorio constant: En esta carpeta se crean archivos correspondientes a las constantes de la simulación, valores como la gravedad, los criterios de turbulencia, y de transporte; además se tiene un subdirectorio en el que se define la geometría de la malla y las características físicas de los bordes.
- Directorio system: Este último directorio contiene todos los criterios necesarios para la solución del problema. Se define un volumen inicial de agua si es necesario, y se generan los algoritmos y funciones necesarias para la solución de las ecuaciones de gobierno del flujo, además, se define el solver que se utilizará dentro de la simulación.
- Adicional a estos directorios se debe tener un archivo con los datos de la malla.

A continuación se presenta la configuración utilizada para la simulación.

#### a) Directorio 0

Todos los valores asignados sirven únicamente como condiciones iniciales en el tiempo  $t=0$ , una vez iniciada la simulación, nuevas carpetas en diferentes intervalos de tiempo serán creadas en las que se tendrán las condiciones de velocidad, presión, etc en esos tiempos de la simulación.

**0/alpha.water.orig:** En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra la configuración utilizada para la fracción volumétrica (condiciones del agua). Aquí únicamente se configuran los límites del mallado para indicar en qué puntos existe ingreso de agua y en donde no.



Las funciones utilizadas se especifican en el archivo de `alpha.wáter.orig`, siendo para la entrada (`inlet1`) `fixedValue = 1`, esto indica la entrada de agua al sistema, `zeroGradient` indica que esta variable actúa como un muro impermeable, e `inletOutlet = 0` indica que existe ingreso como salida de aire.

Tabla 1. 2: <code>alpha.water.orig</code>		
<b>dimensions</b>	[0 0 0 0 0 0]	
<b>internalField</b>	uniform	0
<b>boundaryField</b>		
<b>patch</b>	<b>type</b>	<b>value</b>
inlet1	fixedValue	1
inlet2	zeroGradient	-----
concretewall	zeroGradient	-----
outlet	zeroGradient	0
atmosphere	inletOutlet	0

**0/U (velocidad):** La Tabla 1. 3 muestra la configuración del archivo correspondiente a la velocidad. Para este archivo existen dos formas principales de configurar la velocidad.

- La primera es con vectores de velocidad, asignando la magnitud de la velocidad que ocurre en la dirección X, Y y Z. Ej: `fixedValue (3 0 0)`, esto significa que al flujo se le da únicamente una velocidad de 3 m/s en la dirección X.
- La segunda es asignar el valor del caudal inicial que recorre por el modelo, y al realizarse la simulación se determina automáticamente la velocidad mediante la ecuación de la continuidad. Ej: `flowRateInletVelocity 10`, esto significa que al modelo ingresa un caudal de 10 m<sup>3</sup>/s.

**Nota:** Tener en cuenta que en el segundo método los valores se encuentran en m<sup>3</sup>/s, y si se desean utilizar otras unidades, se deberá realizar la conversión respectiva.

Para este caso en particular, dado que se tiene un modelo con turbulencia y en el que el flujo no ocurre en una sola dirección, se utilizó el segundo método, asignando el caudal que pasa por el modelo mediante la función `flowRateInletVelocity`.

Tabla 1. 3: U		
<b>dimensions</b>	[0 1 -1 0 0 0]	
<b>internalField</b>	uniform	(1 0 0)
<b>boundaryField</b>		
<b>patch</b>	<b>type</b>	<b>value</b>
inlet1	flowRateInletVelocity	0.026



inlet2	fixedValue	(0 0 0)
concretewall	fixedValue	(0 0 0)
outlet	inletOutlet	(0 0 0) \$internalField
atmosphere	pressureInletOutletVelocity	(0 0 0)

**0/p\_rgh:** La Tabla 1. 4 presenta la configuración del archivo correspondiente a la presión modificada. Dado a que el canal es abierto, la presión en la atmósfera será igual a cero, sin embargo se debe mencionar que al tener un modelo con turbulencia se considera la mezcla del agua con aire por lo que se modifica la presión que actúa sobre las paredes del elemento, teniendo como resultado la presión absoluta menos la presión manométrica del fluido de mayor densidad.

Tabla 1. 4: $p\_rgh$		
<b>dimensions</b>	[1 -1 -2 0 0 0 0]	
<b>internalField</b>	uniform	0
<b>boundaryField</b>		
<b>patch</b>	<b>type</b>	<b>value</b>
inlet1	-----	-----
inlet2	-----	-----
concretewall	-----	-----
outlet	zeroGradient	-----
atmosphere	totalPressure	0
	p0	Uniform 0
	U	Uniform 0
	phi	phi
	rho	rho
	psi	none
	gamma	1

**0/nut:** En la Tabla 1. 5 se muestra la viscosidad cinemática turbulenta, la cual representa la rugosidad en las paredes y el fondo del canal. Para la simulación se debe ingresar el valor de la rugosidad absoluta ( $K_s$ ) del material con el que se trabaja.

Para este caso se tiene una rugosidad  $n$  de Mannig de 0.0122, la rugosidad absoluta equivalente deberá ser calibrada dentro del modelo para obtener las condiciones de velocidad que se presentan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 1. 5: $nut$		
<b>dimensions</b>	[0 2 -1 0 0 0 0]	
<b>internalField</b>	uniform	0



<b>boundaryField</b>		
<b>patch</b>	<b>type</b>	<b>value</b>
inlet1	-----	-----
inlet2	-----	-----
concretewall	nutkRoughWallFunction	0
	Ks	<b>Valor a calibrar</b>
	Cs	0.5
outlet	-----	-----
atmosphere	-----	-----

**0/k:** La energía turbulenta se muestra en la Tabla 1. 6. Este parámetro ha sido determinado mediante experimentación, se sugiere mantenerlo de esa manera o realizar investigación adicional para estimar de manera correcta el valor de la energía turbulenta para proyectos diferentes.

Tabla 1. 6: $k$		
<b>dimensions</b>	[0 2 -2 0 0 0 0]	
<b>internalField</b>	Uniform	0.0001
<b>boundaryField</b>		
<b>patch</b>	<b>Type</b>	<b>value</b>
inlet1	fixedValue	\$internalField
	Intensity	0.05
inlet2	-----	-----
concretewall	kqRWallFunction	\$internalField
outlet	-----	-----
atmosphere	-----	-----

**0/omega:** La tasa específica de disipación viscosa, se presenta en la Tabla 1. 7. Únicamente se asigna este valor al punto de entrada como valor uniforme, y en las paredes y fondo mediante la función *omegaWallFunction*.



<i>Tabla 1. 7: omega</i>		
<b>dimensions</b>	[0 0 -1 0 0 0 0]	
<b>internalField</b>	Uniform	0.003
<b>boundaryField</b>		
<b>patch</b>	<b>Type</b>	<b>value</b>
inlet1	fixedValue	\$internalField
inlet2	-----	-----
concretewall	omegaWallFunction	\$internalField
outlet	-----	-----
atmosphere	-----	-----

## b) Directorio constant

**Constant/g:** En la Tabla 1. 8 se muestra la configuración del archivo *g* de la gravedad, se debe asignar el valor de la gravedad en el eje Z, y tomando como positivo hacia arriba.

<i>Tabla 1. 8: g</i>	
<b>dimensions</b>	[0 1 -2 0 0 0 0]
<b>value</b>	(0 0 -9.81)

**Contant/transportProperties:** Los valores de los parámetros de transporte (Tabla 1. 9) para agua y aire si fijan a una temperatura de 20°C y a con presión igual a la atmosférica.

<i>Tabla 1. 9: transportProperties</i>		
<b>phases</b>	(water air)	
<b>water</b>	transportModel	Newtonian
	nu	[0 2 -1 0 0 0 0] 1e-06
	rho	[1 -3 0 0 0 0 0] 1000
<b>air</b>	transportModel	Newtonian
	nu	[0 2 -1 0 0 0 0] 1.48e-05
	rho	[1 -3 0 0 0 0 0] 1
<b>sigma</b>		[1 0 -2 0 0 0 0] 0.07

**constant/turbulentProperties:** El modelo k0megaSST entrega las propiedades de turbulencia mediante el método RASModel. La configuración de este archivo se muestra en la Tabla 1. 10.



Tabla 1. 10: turbulentProperties		
simulationType	RAS	
RAS	RASModel	kOmegaSST
	turbulence	on
	printCoeffs	on

c) Directorio system.

**System/controlDict:** En la Tabla 1. 11 se muestra la configuración utilizada para el archivo *controlDict*, aquí se indica el tiempo que dura la simulación, el solver a utilizar, la precisión de los resultados, y se controla el número de Courant que asegura la convergencia de la simulación.

El valor de *deltaT* depende del número de divisiones que se desee hacer de la simulación, y el *writeInterval* indica cada cuanto tiempo grabar un intervalo de la simulación. Estos valores se pueden modificar de acuerdo a la precisión que se requiera para los resultados. Dado que en este caso, se necesitan los resultados de velocidad para el final del canal, se utilizará un intervalo de 1/20 segundos para tener resultados precisos sin alargar excesivamente el tiempo de simulación.

Tabla 1. 11: controlDict	
application	interFoam
startFrom	startTime
startTime	0
stopAt	endTime
endTime	4
deltaT	0.1
writeControl	adjustableRunTime
writeInterval	0.05
purgeWrite	0
writeFormat	ascii
writePrecision	6
writeCompression	compressed
timeFormat	general
timePrecision	6
runTimeModifiable	yes
adjustTimeStep	yes
maxCo	1
maxAlphaCo	1
maxDeltaT	1

**system/setFieldsDict:** En este archivo se define el volumen inicial de agua que tendrá la geometría antes de iniciar la simulación.



*Tabla 1. 12: setFieldsDict*

<b>defaultFieldValues</b>	volScalarFieldValue alpha.water 0		
<b>regions</b>	boxToCell	box	(0 0 1) (0 0.3 1.0356)**
		fieldValues	volScalarFieldValue alpha.water 1

\*\* Estos valores son únicamente válidos para este modelo de malla en particular, deberán ser cambiados para otros modelos de mallas.

**system/fvSolution y fvSchemes:** Para la configuración de estos dos archivos se recomienda revisar el manual de usuarios de OpenFoam.



## APENDICE A

### PASOS PARA ACCEDER AL CLUSTER DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA DESDE LOS SISTEMAS OPERATIVOS LINUX Y WINDOWS.

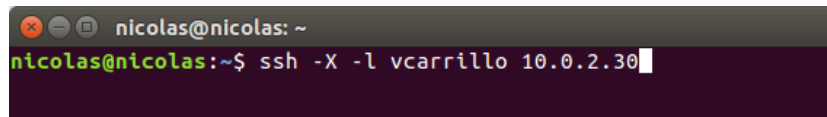
Primero se debe conectar el ordenador al internet de la Universidad de Cuenca mediante un cable de red (es importante que cuando se utilice el cluster se desactive el wifi del ordenador para evitar problemas).

El acceso al cluster de la Universidad de Cuenca se puede realizar desde cualquier sistema operativo, también es necesario contar con un nombre de usuario y una contraseña para ingresar. En este caso se explicarán los pasos para acceder desde Linux y Windows.

#### 1. Acceso desde Linux:

El acceso se lo realiza desde el Terminal colocando el siguiente comando.

`ssh -X -l <Nombre de Usuario> <Dirección IP>`

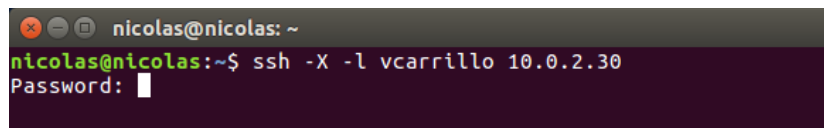


```
nicolas@nicolas: ~
nicolas@nicolas:~$ ssh -X -l vcarrillo 10.0.2.30
```

*Ilustración 26A Ventana del Terminal en donde se ingresa el comando para acceder al cluster de la Universidad de Cuenca.*

Luego de este comando se ingresa la contraseña y entonces se accede al cluster. La dirección IP a colocar es (10.0.2.30).

**Nota:** En el terminal la contraseña es invisible, una vez de que se la escriba, se da *Enter* y automáticamente se ingresa al cluster.

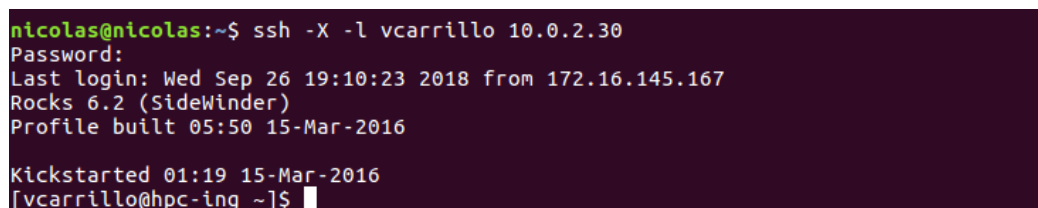


```
nicolas@nicolas: ~
nicolas@nicolas:~$ ssh -X -l vcarrillo 10.0.2.30
Password:
```

*Ilustración 27A Ingreso de la contraseña*

Una vez se ha ingresado al cluster se debe acceder al directorio donde se encuentra instalado el programa de openFoam para activarlo.

`cd /data/apps/OpenFOAM/`



```
nicolas@nicolas:~$ ssh -X -l vcarrillo 10.0.2.30
Password:
Last login: Wed Sep 26 19:10:23 2018 from 172.16.145.167
Rocks 6.2 (SideWinder)
Profile built 05:50 15-Mar-2016
Kickstarted 01:19 15-Mar-2016
[vcarrillo@hpc-ing ~]$
```

*Ilustración 28A Indicador de que se ha ingresado al cluster exitosamente.*



Luego se ingresa el siguiente comando.

*source of40.sh*

```
nicolas@nicolas:~$ ssh -X -l vcarrillo 10.0.2.30
Password:
Last login: Wed Sep 26 19:10:23 2018 from 172.16.145.167
Rocks 6.2 (SideWinder)
Profile built 05:50 15-Mar-2016

Kickstarted 01:19 15-Mar-2016
[vcarrillo@hpc-ing ~]$ cd /data/apps/OpenFOAM
[vcarrillo@hpc-ing OpenFOAM]$ source of40.sh
[vcarrillo@hpc-ing OpenFOAM]$
```

*Ilustración 29A Se accede al lugar de origen del programa y se ejecuta el comando indicado.*

Con esto el software queda habilitado para ser utilizado. Luego de esto se puede regresar al inicio o “~” utilizando el comando “cd ~”. Se recomienda crear un directorio nuevo en donde colocar los datos que serán copiados desde la computadora hasta el cluster, se utiliza el comando “mkdir” para crear un nuevo directorio.

**Nota:** Debido a algunos cambios realizados en la configuración del cluster, se puede omitir el paso de ingreso al directorio */data/apps/OpenFOAM*, y utilizar el programa OpenFoam directamente al ingresar al directorio donde se tenga el proyecto.

Para copiar los datos desde la computadora hasta el cluster se utiliza el siguiente comando directamente desde el Terminal en el ordenador, no en el cluster.

*scp -r <Carpeta de origen> <Nombre de Usuario>@<Dirección IP>:~/<Directorio>*

```
nicolas@nicolas: ~
nicolas@nicolas:~$ scp -r Documents/Tesis/Canal_Lab vcarrillo@10.0.2.30:~/Tesis_NM
```

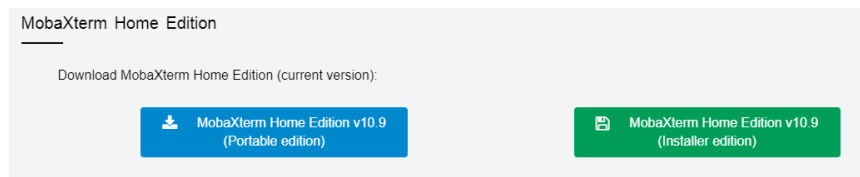
*Ilustración 30A Comando utilizado para cargar los datos al cluster.*

Una vez finalizado el copiado de los archivos se puede proceder a realizar la simulación dentro del cluster de la Universidad de Cuenca.

**Nota:** Tener en cuenta siempre el orden de las letras mayúsculas y minúsculas al ingresar los comandos, caso contrario se producirá un error dentro del terminal.

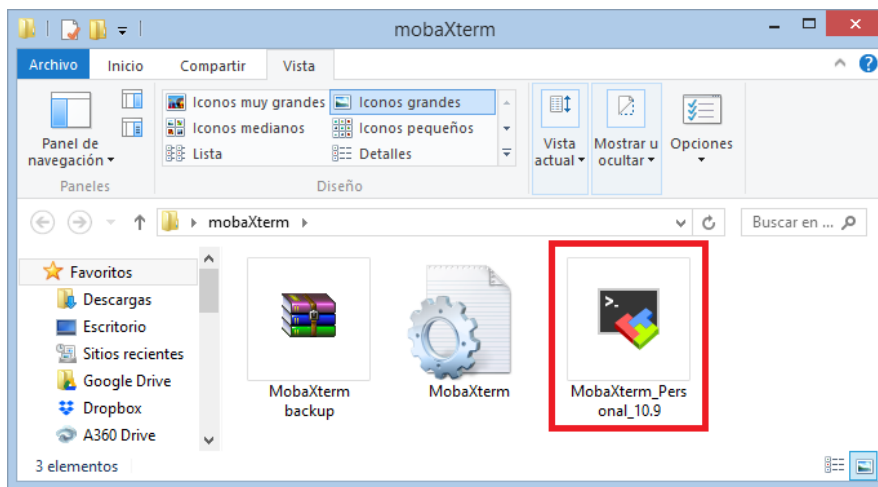
## 2. Acceso desde Windows.

Para acceder desde Windows se debe descargar la aplicación *mobaXterm* la cual genera la ventana para acceder al cluster. La descarga se la puede realizar desde la página web <https://mobaxterm.mobatek.net/download-home-edition.html>, se elige la versión portable (Portable edition).

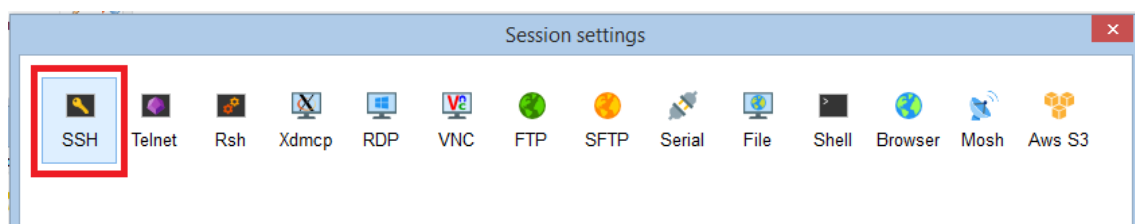


*Ilustración 31A Versiones de mobaXterm para descargar desde la página oficial.*

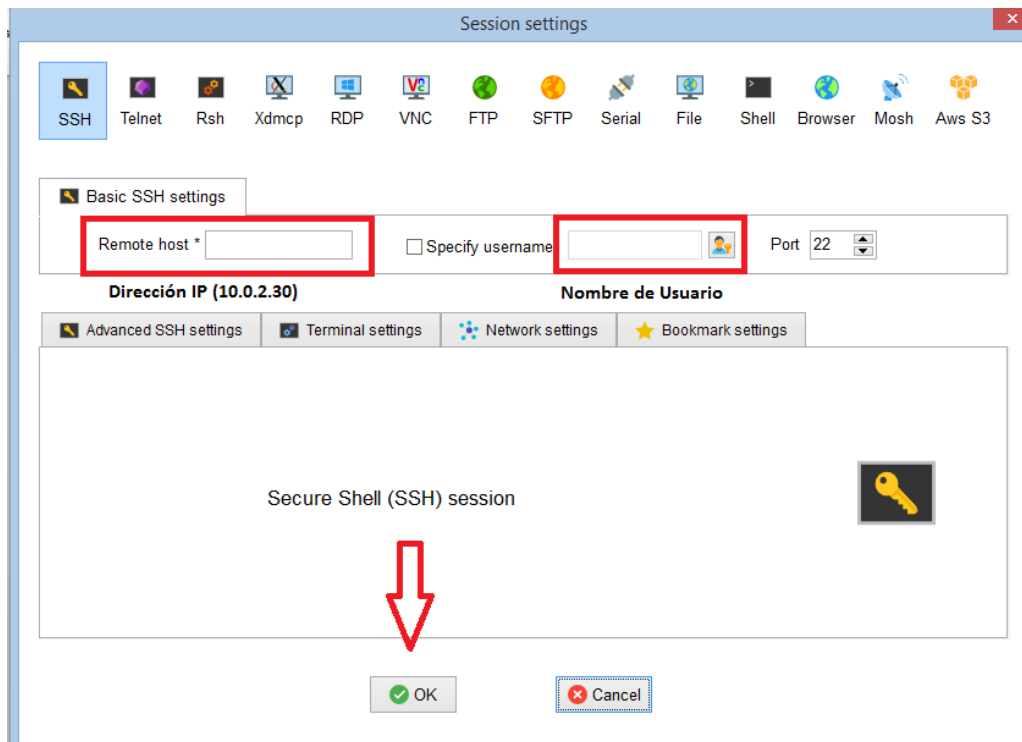
Luego de que se ha completado la descarga no es necesario instalar, únicamente se abre y ya se puede empezar a utilizarlo.



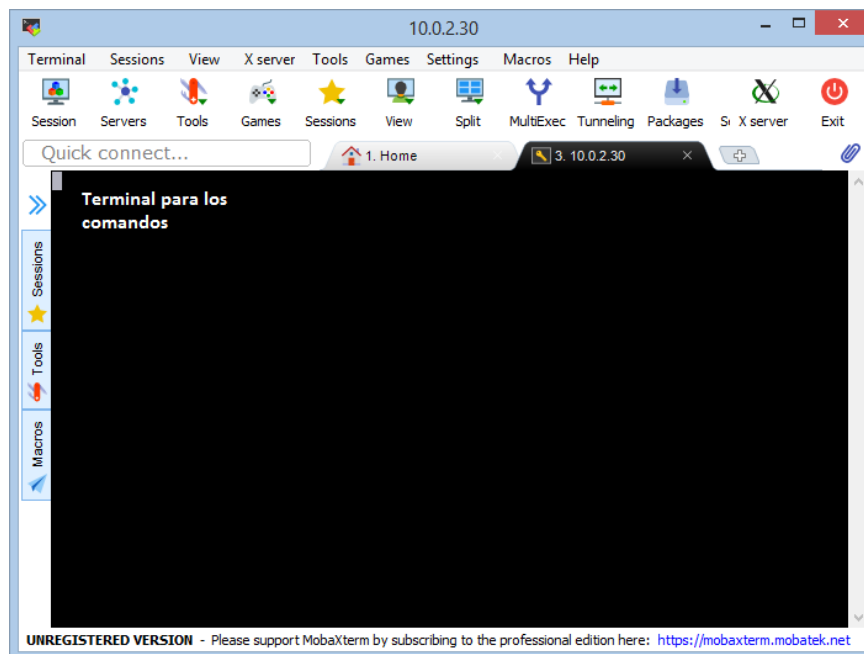
*Ilustración 32A Icono del programa MobaXterm.*



*Ilustración 33A Se elige el tipo de sesión SSH.*



*Ilustración 34A Se ingresan los datos de la dirección IP y del nombre de usuario, luego se da clic en OK.*



*Ilustración 35A. A continuación se abre esta ventana en donde se pedirá primero el ingreso de la contraseña, y luego se podrá proceder a realizar todas las tareas para la simulación.*



En la parte izquierda de la ventana mostrada se presenta una pestaña que muestra las carpetas existentes dentro del cluster, además de opciones para cargar nuevos archivos desde la computadora, a diferencia de Ubuntu, en Windows únicamente se pueden subir archivos y no carpetas completas. Además se requiere la versión premium del programa para poder subir archivos de gran tamaño.



## APENDICE B

### PASOS PARA REALIZAR UNA SIMULACIÓN NUMÉRICA EJECUTANDO APLICACIONES EN PARALELO.

En este apéndice se describe el proceso para ejecutar una simulación en openFoam en paralelo. Este método se utiliza cuando se cuenta con un ordenador con varios procesadores o se pueden conectar varios ordenadores para que trabajen en conjunto. El método que se utiliza se denomina “descomposición del dominio” en la que la geometría que se utilizará para la simulación es dividida en partes que se ubican en cada uno de los procesadores para su resolución, esto significa que la malla (Mesh) así como las condiciones de borde serán divididas de igual manera y asignadas a un procesador para su resolución.

En openFoam se utiliza el dominio público openMPI por defecto para la ejecución en paralelo, sin embargo es posible utilizar otras bibliotecas.

#### 1. Pasos a seguir:

Para realizar la simulación en paralelo se deben seguir los mismos pasos que para una simulación regular, es decir se debe generar el mallado del caso, configurar las condiciones de borde en las carpetas 0, constant y system, y definir el tipo de solver que se utilizará para la simulación.

Para la descomposición se utiliza el comando *decomposePar* de manera que se consiga una solución que economice los recursos del computador. El comando se basa en los parámetros establecidos en el archivo *decomposeParDict*, el cual se ubica en la carpeta *system* para el caso de estudio.

#### 1.1. Configuración del archivo decomposeParDict:

En este archivo se deben establecer el número de procesadores con que se cuenta para la simulación, así como el método de descomposición que se utilizará. Finalmente se indica el número de partes en las que se desea dividir la geometría. En la Ilustración 36B se puede observar un ejemplo de cómo configurar el archivo *decomposeParDict*.

```

17  numberOfSubdomains 4;
18
19  method              simple;
20
21  simpleCoeffs
22  {
23      n                (2 2 1);
24      delta            0.001;
25  }
26
27  hierarchicalCoeffs
28  {
29      n                (1 1 1);
30      delta            0.001;
31      order            xyz;
32  }
33
34  manualCoeffs
35  {
36      dataFile         "";
37  }
38
39  distributed          no;
40
41  roots                ( );
42
43
44  // *****
45  // *****

```

Ilustración 36B Archivo *decomposeParDict* (adaptado del manual de usuario de OpenFoam)



Dentro de la carpeta *decomposeParDict* se tienen que definir los siguientes parámetros:

- numberOfSubdomains <Número de procesadores a utilizar>
- method <método de descomposición>

Existen cuatro métodos principales para la descomposición, simple, hierarchical, scotch y manual. Todos estos métodos descomponen el caso de estudio de manera diferente (para mayor información refiérase al manual de usuario de OpenFoam, capítulo 3, sección 3.4.1).

#### 1.1.1. Método Simple.

- n hace referencia al número de divisiones que se realizará a la malla. Se debe dividir la geometría en partes iguales al número de procesadores que se utilicen, por ejemplo: Si se utilizan 4 procesadores, se puede realizar la división de tal manera que  $n = (2 \ 2 \ 1)$  esto significa que se dividirá en dos partes en el eje X, dos partes en el eje Y y una parte en el eje Z, teniendo 4 partes en total.
- Delta: normalmente se utiliza el valor de 0.001

#### 1.1.2. Método hierarchical:

Este método es similar al método simple, únicamente varía en que el usuario elige el orden en el que se descompone la malla. Por ejemplo: primero se divide en el eje Y, luego en el eje Z y finalmente en el eje X.

#### 1.1.3. Método scotch:

Este método no requiere del ingreso de parámetros por parte del usuario, en cambio se intenta descomponer el caso de manera que se utilice la menor cantidad de recursos por parte del procesador. El usuario puede especificar la capacidad máxima de cada procesador, esto es muy útil en máquinas con procesadores de diferente capacidad.

#### 1.1.4. Método Manual:

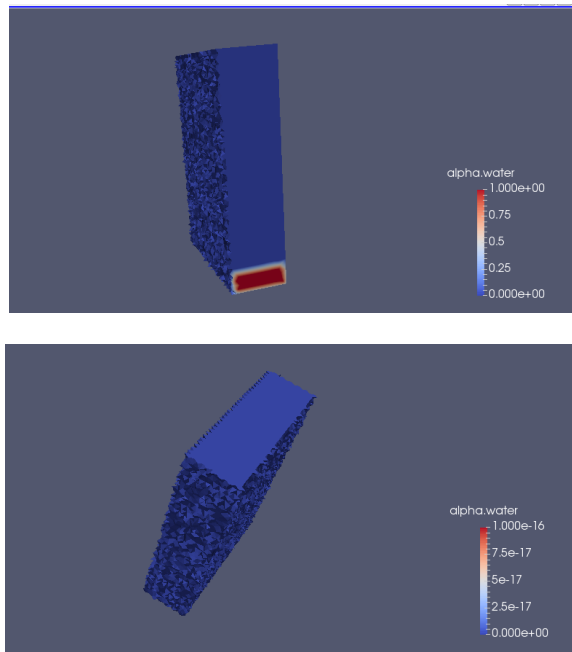
En este método el usuario especifica de forma manual en qué partes se descompone la geometría del caso de estudio.

### 2. Ejecución:

Una vez creado el directorio *decomposeParDict* se puede proceder a realizar la simulación, es recomendable que el usuario realice una copia de seguridad del caso de estudio antes de correr la simulación.

- El primer paso es crear la malla, ya sea utilizando el comando **blockMesh**, o **exportando** la malla desde cualquiera de los software compatibles con openFoam.
- Seguido de esto se definen las condiciones de frontera con el comando **setFields**, aquí se crearán las carpetas necesarias para la simulación (alpha.water).
- En tercer lugar se realiza la descomposición de la geometría con el comando **decomposePar**, con este comando se siguen los criterios establecidos en el directorio

del mismo nombre y se crearán automáticamente las carpetas con el nombre *processorN*; en donde  $N = 0, 1, \dots$  número de procesadores especificados para la simulación. Se puede chequear que la descomposición de la geometría sea correcta, ingresando a las carpetas *processor* desde el terminal y aplicando el comando *paraFoam*.



*Ilustración 37B Geometría dividida en diferentes procesadores.*

- Finalmente se corre la simulación en paralelo, ejecutando el siguiente comando.  
***mpirun -np <N° de procesadores> <Solver> -parallel >log***  
 Para este caso particular se utilizarán 16 procesadores ubicados en el cluster y se utilizará el solver *interFoam*, por lo que el comando deberá quedar de la siguiente manera.  
***mpirun -np 16 interFoam -parallel &>simulación.log &***  
*>simulación.log* almacena todos los procesos realizados por el ordenador durante la simulación dentro de un archivo de bloc de notas.  
 La colocación de los símbolos “&” permite que el proceso se ejecute en segundo plano, pudiendo realizar otras actividades mientras se ejecuta la simulación.  
 Al momento de dar *enter* aparecerá en pantalla un número de proceso, se puede seguir el avance de la simulación visualizando el proceso mediante el comando *top*.





```
[vcarrillo@hpc-ing ~]$ top
top - 10:01:19 up 10 days, 44 min, 1 user, load average: 1.34, 1.27, 1.28
Tasks: 914 total, 2 running, 912 sleeping, 0 stopped, 0 zombie
Cpu(s): 3.1%us, 0.3%sy, 0.0%ni, 96.4%id, 0.2%wa, 0.0%hi, 0.1%si, 0.0%st
Mem: 98944864k total, 98393588k used, 551276k free, 5823072k buffers
Swap: 10239996k total, 0k used, 10239996k free, 77886704k cached

  PID USER      PR  NI  VIRT  RES  SHR S %CPU  %MEM    TIME+  COMMAND
 9564 vcarrill  20   0 1337m 1.2g 37m R 100.0  1.2   4369.40 interFoam
 5018 root      20   0    0    0    0 S   3.3   0.0   23:19.95 nfsd
 5013 root      20   0    0    0    0 S   1.3   0.0   23:10.33 nfsd
 5016 root      20   0    0    0    0 S   1.3   0.0   23:48.47 nfsd
 5015 root      20   0    0    0    0 S   0.7   0.0   23:10.28 nfsd
 5012 root      20   0    0    0    0 S   0.3   0.0   23:37.46 nfsd
 5017 root      20   0    0    0    0 S   0.3   0.0   21:59.47 nfsd
 5483 mongod    20   0 1100m 84m 6904 S   0.3   0.1   49:36.25 mongod
30062 vcarrill  20   0 15708 1940 952 R   0.3   0.0    0:00.07 top
   1 root      20   0 19364 1640 1312 S   0.0   0.0    0:02.67 init
   2 root      20   0    0    0    0 S   0.0   0.0    0:00.01 kthreadd
   3 root      RT   0    0    0    0 S   0.0   0.0    0:39.88 migration/0
   4 root      20   0    0    0    0 S   0.0   0.0    0:00.86 ksoftirqd/0
   5 root      RT   0    0    0    0 S   0.0   0.0    0:00.00 stopper/0
   6 root      RT   0    0    0    0 S   0.0   0.0    0:00.68 watchdog/0
   7 root      RT   0    0    0    0 S   0.0   0.0    0:02.06 migration/1
   8 root      RT   0    0    0    0 S   0.0   0.0    0:00.00 stopper/1
   9 root      20   0    0    0    0 S   0.0   0.0    0:00.44 ksoftirqd/1
  10 root      RT   0    0    0    0 S   0.0   0.0    0:00.60 watchdog/1
  11 root      RT   0    0    0    0 S   0.0   0.0    0:03.60 migration/2
  12 root      RT   0    0    0    0 S   0.0   0.0    0:00.00 stopper/2
  13 root      20   0    0    0    0 S   0.0   0.0    0:00.23 ksoftirqd/2
  14 root      RT   0    0    0    0 S   0.0   0.0    0:00.71 watchdog/2
  15 root      RT   0    0    0    0 S   0.0   0.0    0:01.93 migration/3
  16 root      RT   0    0    0    0 S   0.0   0.0    0:00.00 stopper/3
  17 root      20   0    0    0    0 S   0.0   0.0    0:00.18 ksoftirqd/3
  18 root      RT   0    0    0    0 S   0.0   0.0    0:00.63 watchdog/3
  19 root      RT   0    0    0    0 S   0.0   0.0    0:00.87 migration/4
  20 root      RT   0    0    0    0 S   0.0   0.0    0:00.00 stopper/4
```

*Ilustración 38B Visualización del proceso mediante el comando top.*

En caso de que se desee cancelar una simulación solo se debe escribir el comando `kill -9 <número_proceso>` y la simulación terminará inmediatamente.

Para mayor información se sugiere al lector consultar el manual de usuario de openFoam, capítulo 3, sección 3.4.

Adicionalmente se debe mencionar que el cluster de la universidad contiene 12 nodos cada uno con 32 procesadores disponibles, lo cual podría mejorar significativamente los tiempos de la simulación.

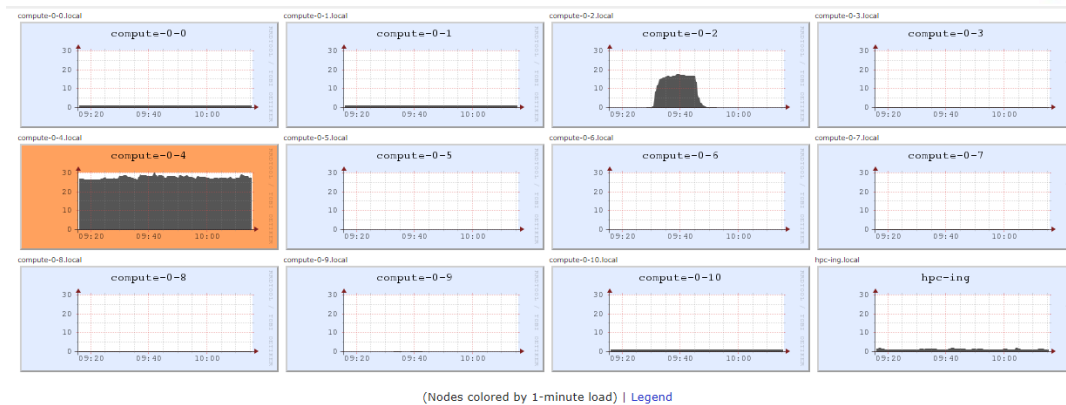
Se tiene el nodo master hpc-ing, y los nodos compute-0-M; donde M = 0,1, ..., 10.\*

Se puede acceder a los directorios desde cualquiera de estos nodos.

Luego de ingresar al cluster (ver Apéndice A), se puede acceder a cualquier nodo escribiendo el comando

`ssh compute-0-M*.`

Para regresar al nodo master únicamente se escribe el comando `exit`.



*Ilustración 39B Visualización de los nodos del cluster.*

En la Ilustración 39B se puede observar que los nodos 2 y 4 están trabajando a toda su capacidad mientras que los nodos 0, 1, 10, y el nodo master están realizando un trabajo mínimo.

Aunque es posible realizar una simulación en paralelo utilizando todos los nodos del cluster (un total de 384 procesadores), no se recomienda esta práctica debido a existen problemas de escalabilidad y utilizar muchos procesadores puede resultar en un tiempo de simulación más largo que si se utilizan el número óptimo de procesadores.

Se realizaron algunas pruebas con simulaciones y se determinó que el número óptimo de procesadores para utilizar es de 24 a 25 procesadores utilizando únicamente 1 nodo.

Para esto se tendría un *numberOfSubdomains* 24 y *n* (6 4 0), o *numberOfSubdomains* 25 y *n* (5 5 0). Ver Ilustración 36B. El comando a utilizar para la simulación en paralelo del segundo caso quedaría como:

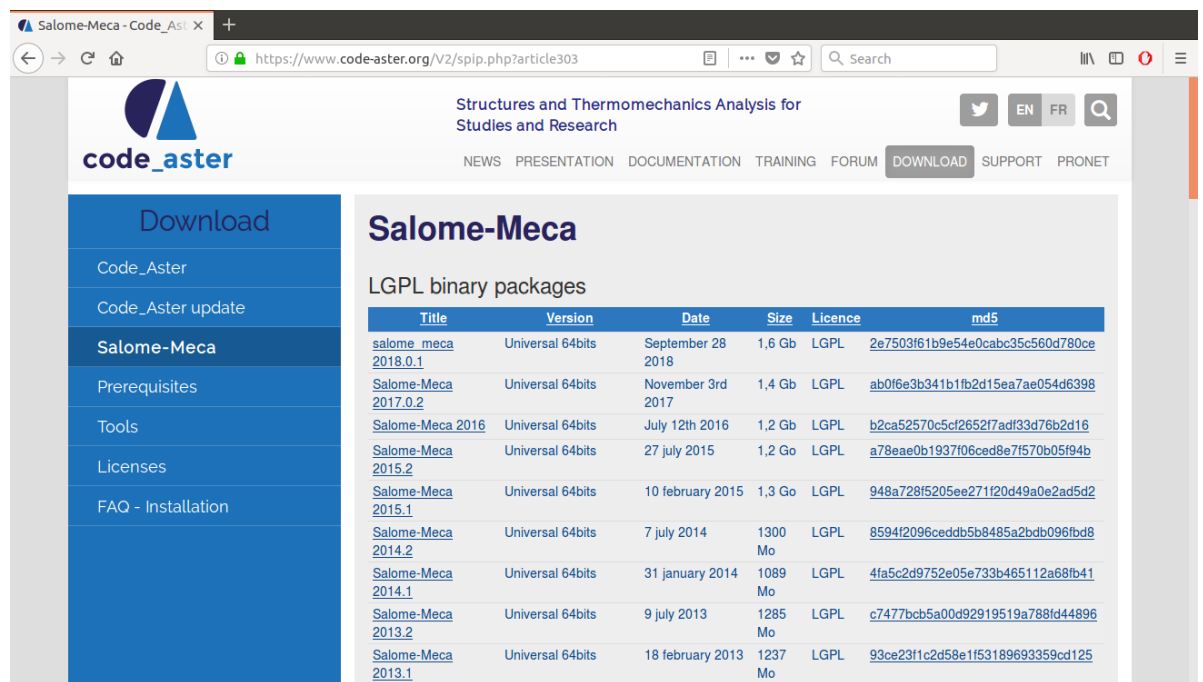
```
mpirun -np 25 interFoam -parallel &>simulación.log &
```

## APENDICE C

### PROCEDIMIENTOS PARA LA FABRICACIÓN DE UNA MALLA MEDIANTE EL SOFTWARE SALOME-MECA.

En este apéndice se describe el proceso básico para la fabricación de una malla para poder utilizarla en una simulación en openFoam.

Cómo primer paso se debe descargar el programa para la computadora, se accede a la página de [www.code-aster.org](http://www.code-aster.org) y en la pestaña de Salome – Meca se elige en la parte dónde dice *Title* la versión del programa que se desee descargar.



Title	Version	Date	Size	Licence	md5
<a href="#">salome_meca 2018.0.1</a>	Universal 64bits	September 28 2018	1,6 Gb	LGPL	<a href="#">2e7503f61b9e54e0cab35c560d780ce</a>
<a href="#">Salome-Meca 2017.0.2</a>	Universal 64bits	November 3rd 2017	1,4 Gb	LGPL	<a href="#">ab0f6e3b341b1fb2d15ea7ae054d6398</a>
<a href="#">Salome-Meca 2016</a>	Universal 64bits	July 12th 2016	1,2 Gb	LGPL	<a href="#">b2ca52570c5cf2652f7ad33d76b2d16</a>
<a href="#">Salome-Meca 2015.2</a>	Universal 64bits	27 july 2015	1,2 Go	LGPL	<a href="#">a78eae0b1937f06ced8e7f570b05f94b</a>
<a href="#">Salome-Meca 2015.1</a>	Universal 64bits	10 february 2015	1,3 Go	LGPL	<a href="#">948a728f5205ee271f20d49a0e2ad5d2</a>
<a href="#">Salome-Meca 2014.2</a>	Universal 64bits	7 july 2014	1300 Mo	LGPL	<a href="#">8594f2096ceddb5b8485a2bdb096fbd8</a>
<a href="#">Salome-Meca 2014.1</a>	Universal 64bits	31 january 2014	1089 Mo	LGPL	<a href="#">4fa5c2d9752e05e733b465112a68fb41</a>
<a href="#">Salome-Meca 2013.2</a>	Universal 64bits	9 july 2013	1285 Mo	LGPL	<a href="#">c7477bcb5a00d92919519a788fd44896</a>
<a href="#">Salome-Meca 2013.1</a>	Universal 64bits	18 february 2013	1237 Mo	LGPL	<a href="#">93ce23f1c2d58e1f53189693359cd125</a>

Ilustración 40C Página para descargar el programa Salome-Meca.

#### Crear una geometría.

1. Una vez descargado el programa, se lo instala y ya está listo para utilizar. Al abrir el programa se debe crear un nuevo proyecto, acto seguido en la barra principal de la parte de arriba (*Module*) se elige la opción *Geometry*, esta opción habilita todos los comandos para poder crear la geometría de la malla.

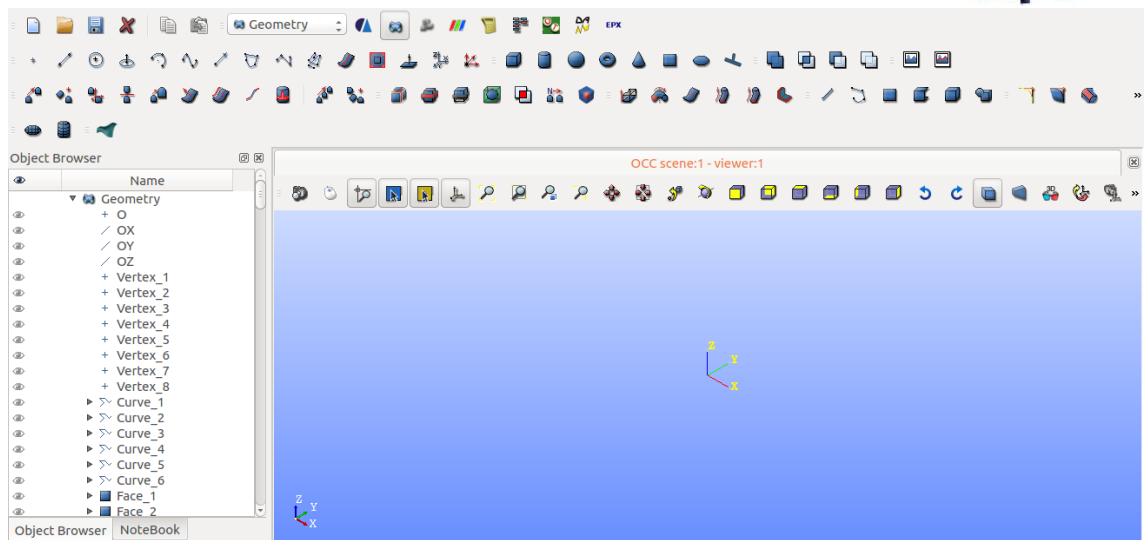


Ilustración 41C Interfaz del programa al iniciar.

2. Lo siguiente que se debe hacer es crear los puntos de la geometría, se da clic en *Create a point*, la ventana Point Construction se activa en la que se ingresan las coordenadas de los puntos de la geometría, luego se da clic en *Apply* y se ingresa el siguiente punto. Cuando se han ingresado todos los puntos se da clic en *Apply and Close* y la ventana se cierra automáticamente. Se pueden crear punto de diferentes maneras aparte de ingresando las coordenadas, indicando un punto de referencia, un punto a una distancia dada de una línea, un punto en la intersección de dos líneas, punto en una cara, todas estas opciones facilitan la modificación de geometrías ya avanzadas.

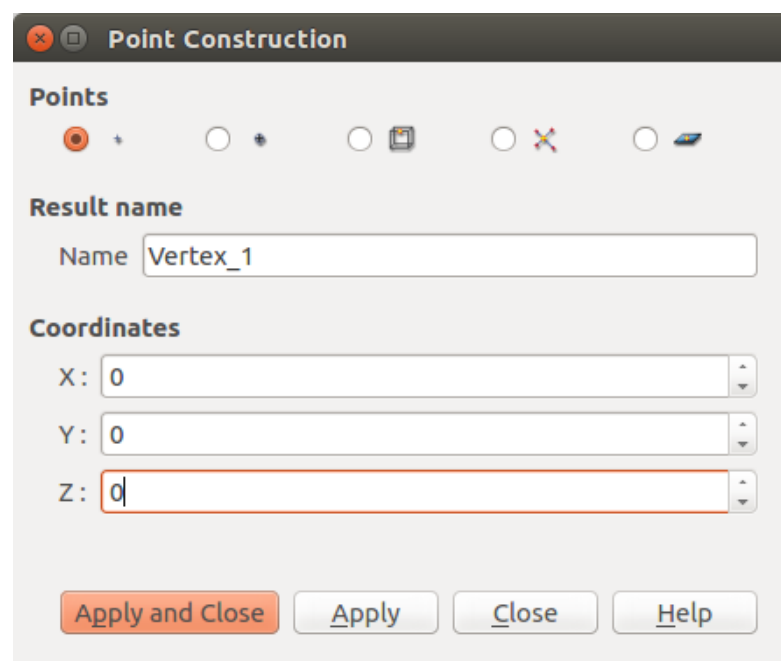


Ilustración 42C Ingreso de las coordenadas para los puntos.

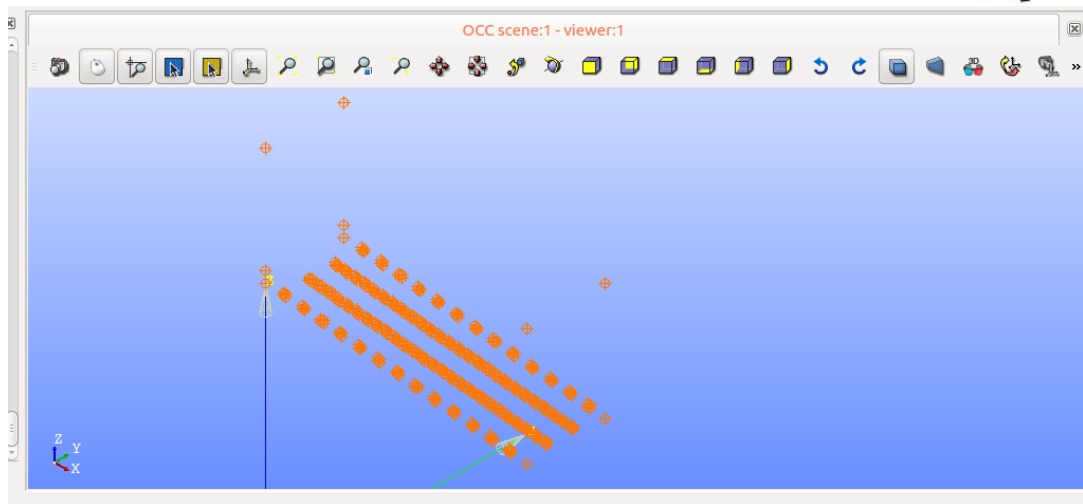


Ilustración 43C Todos los puntos ingresados.

**Nota:** En la parte izquierda se crean los elementos y en todo momento se los puede activar a desactivar haciendo clic sobre el *ojo*, para mostrarlo u ocultarlo en pantalla y hacer más sencillo el trabajo.

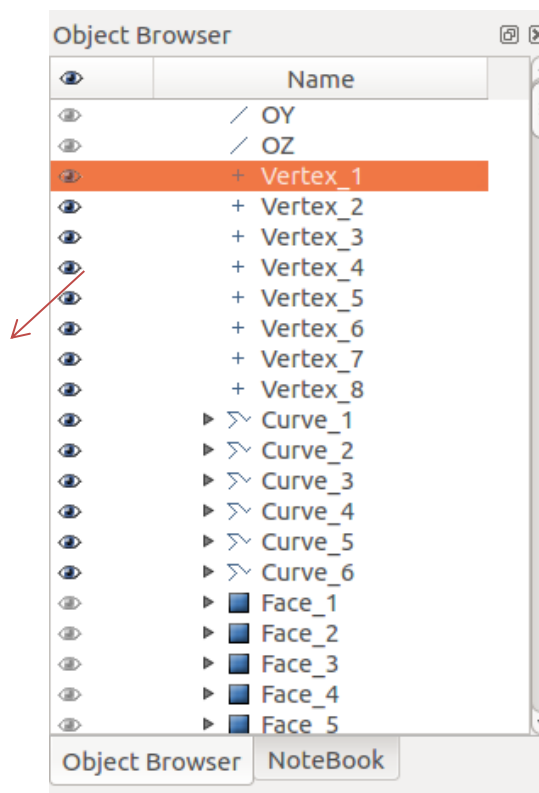


Ilustración 44C Ventana que muestra los elementos de la geometría creados hasta el momentos, y como ocultarlos de la pantalla.

3. Luego de ingresados todos los puntos, se proceden a crear los perfiles, esto se realiza mediante una curva que une a los puntos, dando clic en *Create a Curve*, se despliega la

ventana *Curve Construction* en la que se da nombre a la curva, luego en *Nodes* se activa la opción *Build a closed wire* y, en *Points* se seleccionan los puntos para crear el perfil, (se debe mantener presionando la tecla *Shift* para que se forme la superficie). Luego se da clic en *Apply* y se procede a crear el siguiente perfil.

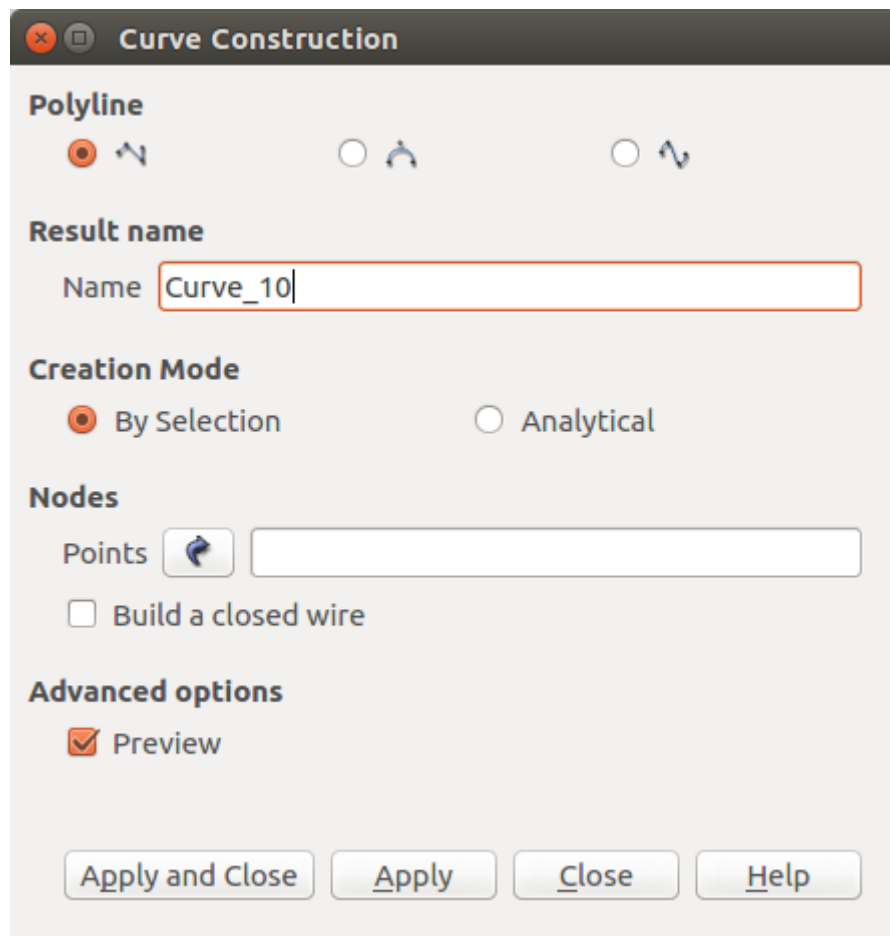


Ilustración 45C Ventana para crear perfiles de la geometría.

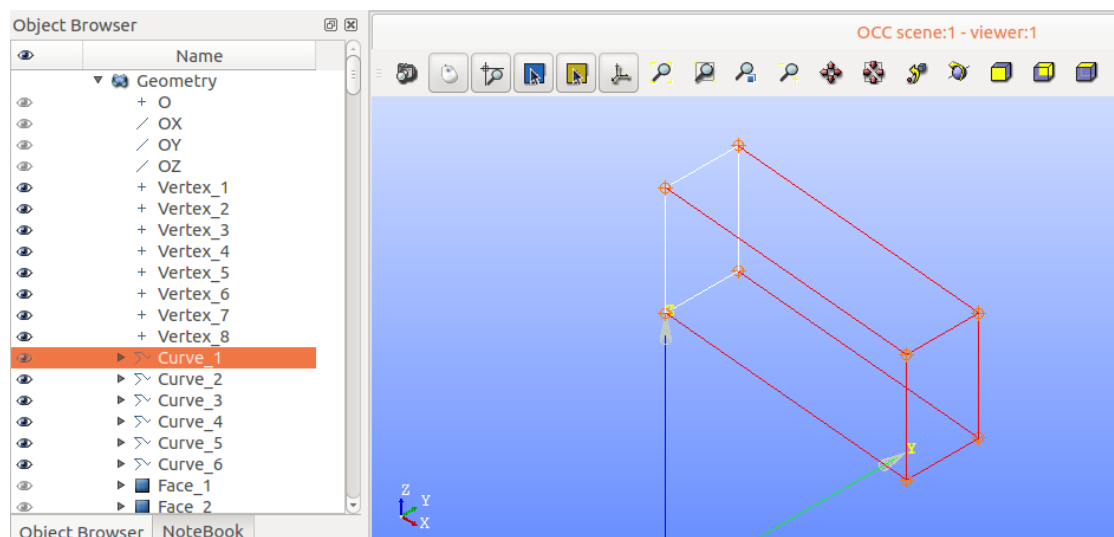


Ilustración 46C Curvas principales de la geometría.

4. El siguiente paso es crear superficies o caras a partir de los perfiles creados en el paso anterior. Se da clic en la opción *Build face* y se despliega la ventana *Create A Face*, en esta ventana se elige el perfil que se desee convertir en superficie (en este caso *Curve\_1*) y se da clic en *Apply*, se procede a crear la siguiente superficie.

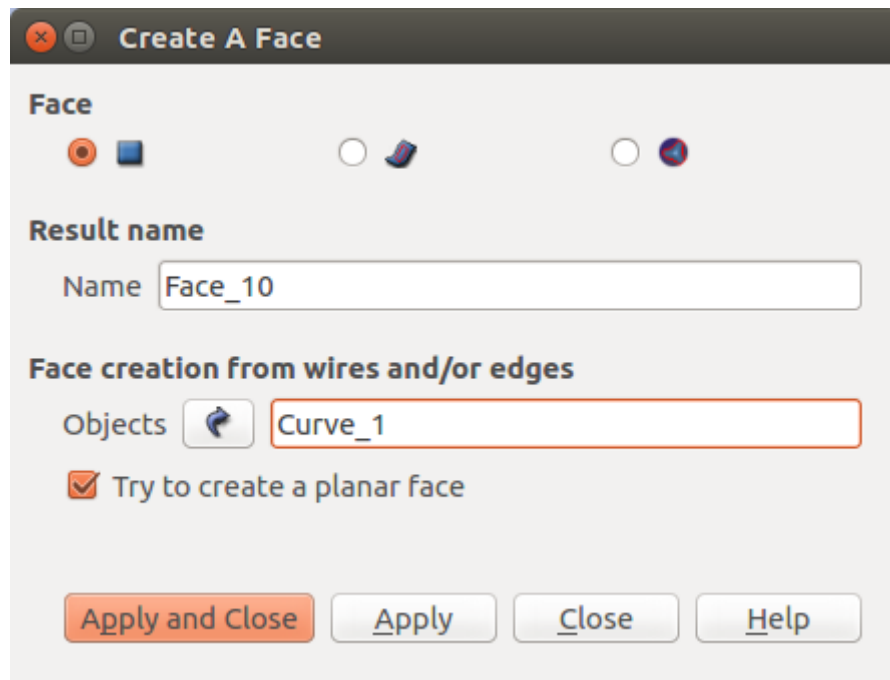


Ilustración 47C Ventana para crear superficies a partir de curvas.

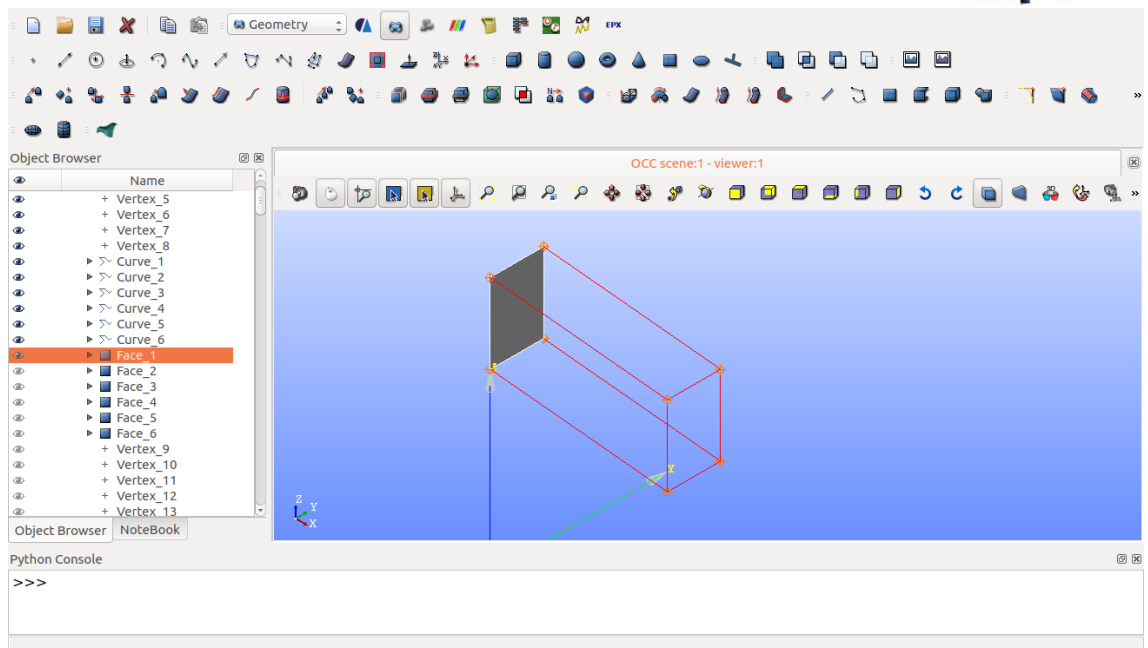


Ilustración 48C Superficie 1 creada (Face\_1)

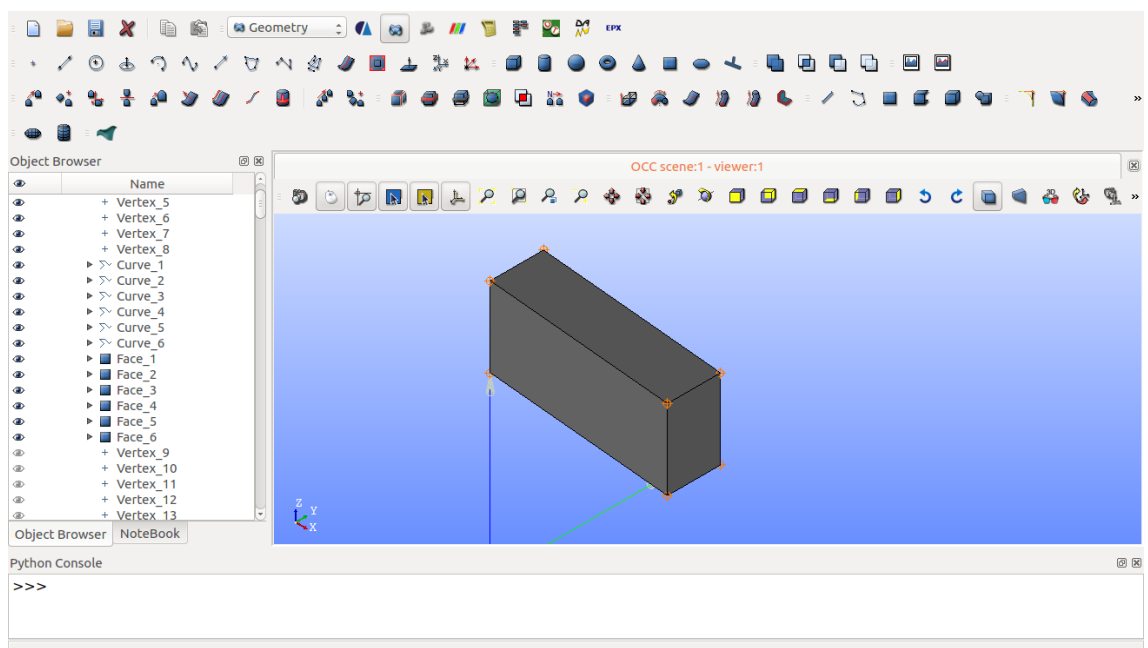


Ilustración 49C Todas las superficies que encierran la geometría ya creadas.

5. Todas las superficies creadas se las debe unir en un cascarón o *Shell*, esto se lo realiza en la opción *Build Shell*, la ventana *Shell Construction* se abre, y en *Arguments* se eligen todas las superficies creadas que se quieran unir, luego se da clic en *Apply*.



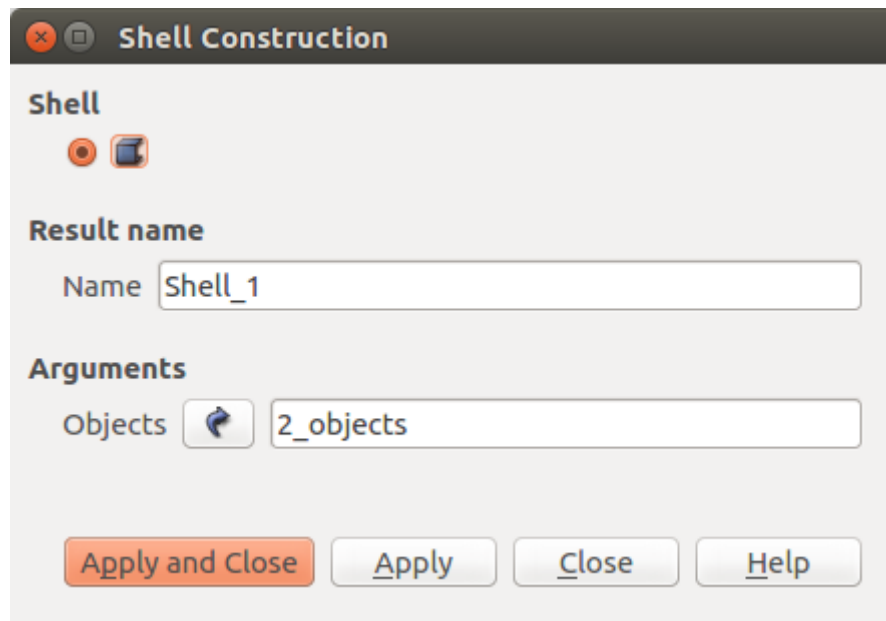


Ilustración 50C Ventana para construir el Shell

**Nota:** Para crear un Shell todas las superficies deben estar en contacto, además no deben existir superposición de las caras de una superficie sobre otra, caso contrario el Shell no se creará correctamente.

6. Finalmente se crea un sólido a partir del Shell y con esto la geometría queda lista para ser convertida a una malla. Se utiliza la opción *Build Solid*, y se despliega la ventana *Solid Construction*, en objects se elige el Shell creado y se da clic en *Apply*.

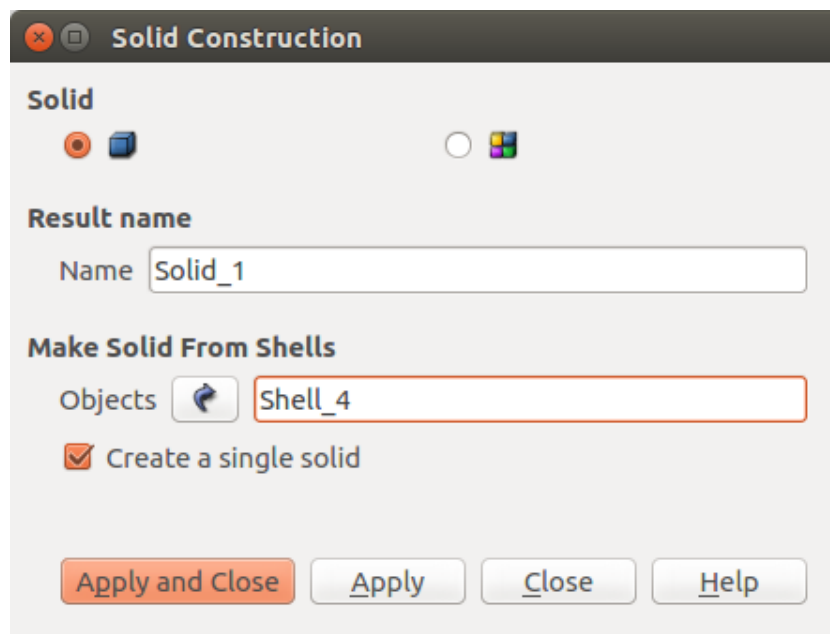


Ilustración 51C Ventana para crear el sólido.

7. Para tener una malla con diferentes secciones, se da clic derecho en el sólido creado y se elige la opción *Create Groups*. La ventana del mismo nombre se despliega, se elige la tercera opción. En la pantalla con la tecla Shift presionada, se eligen las caras del sólido creado para formando los grupos. Por ejemplo, en Group Name se nombra como inlet1. Luego se da clic en la cara delantera para formar el ingreso del agua a la malla, se da clic en *Add* y cuando se tengan todas las caras agregadas se da clic en *Apply*. Y se procede a crear el siguiente grupo.

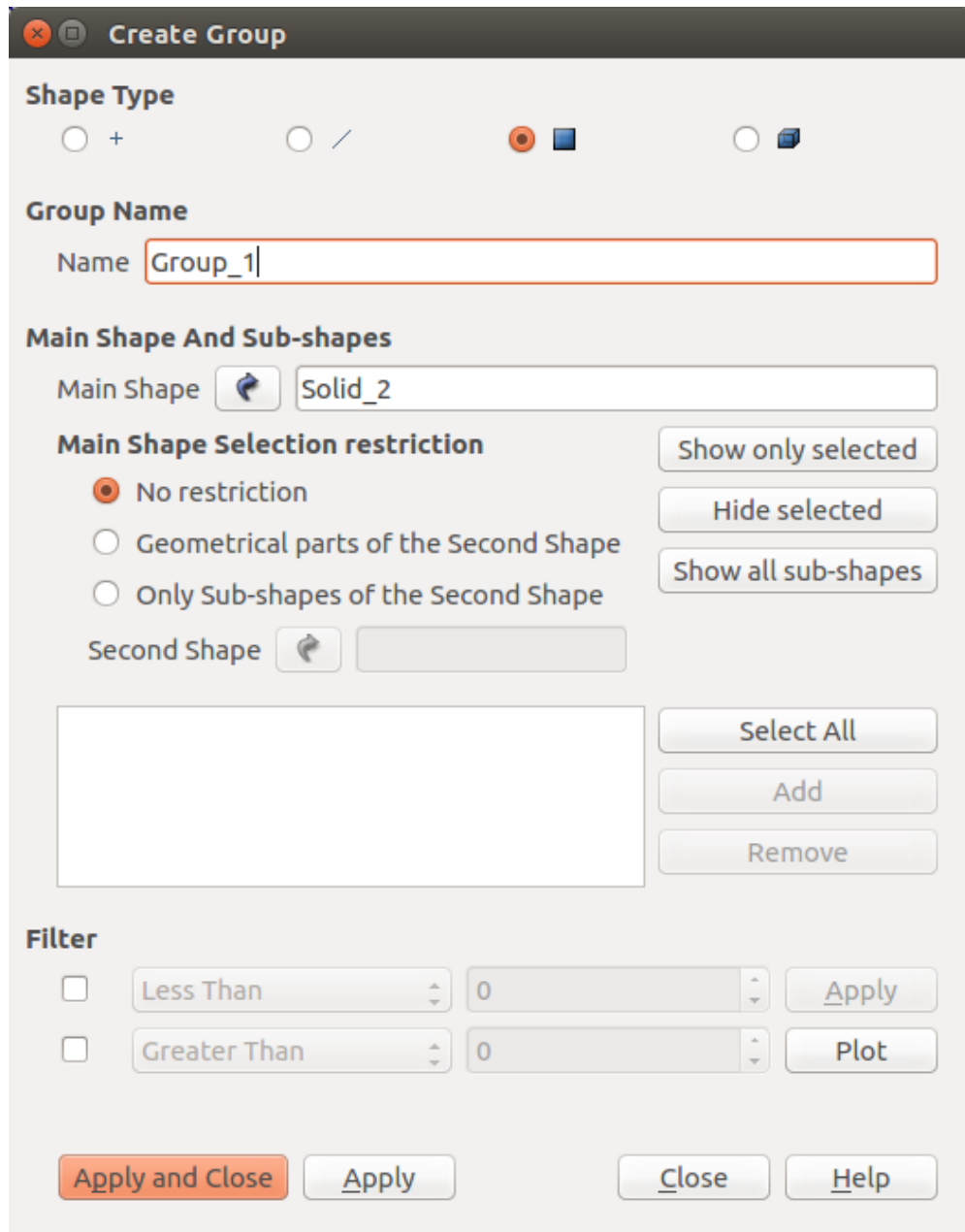
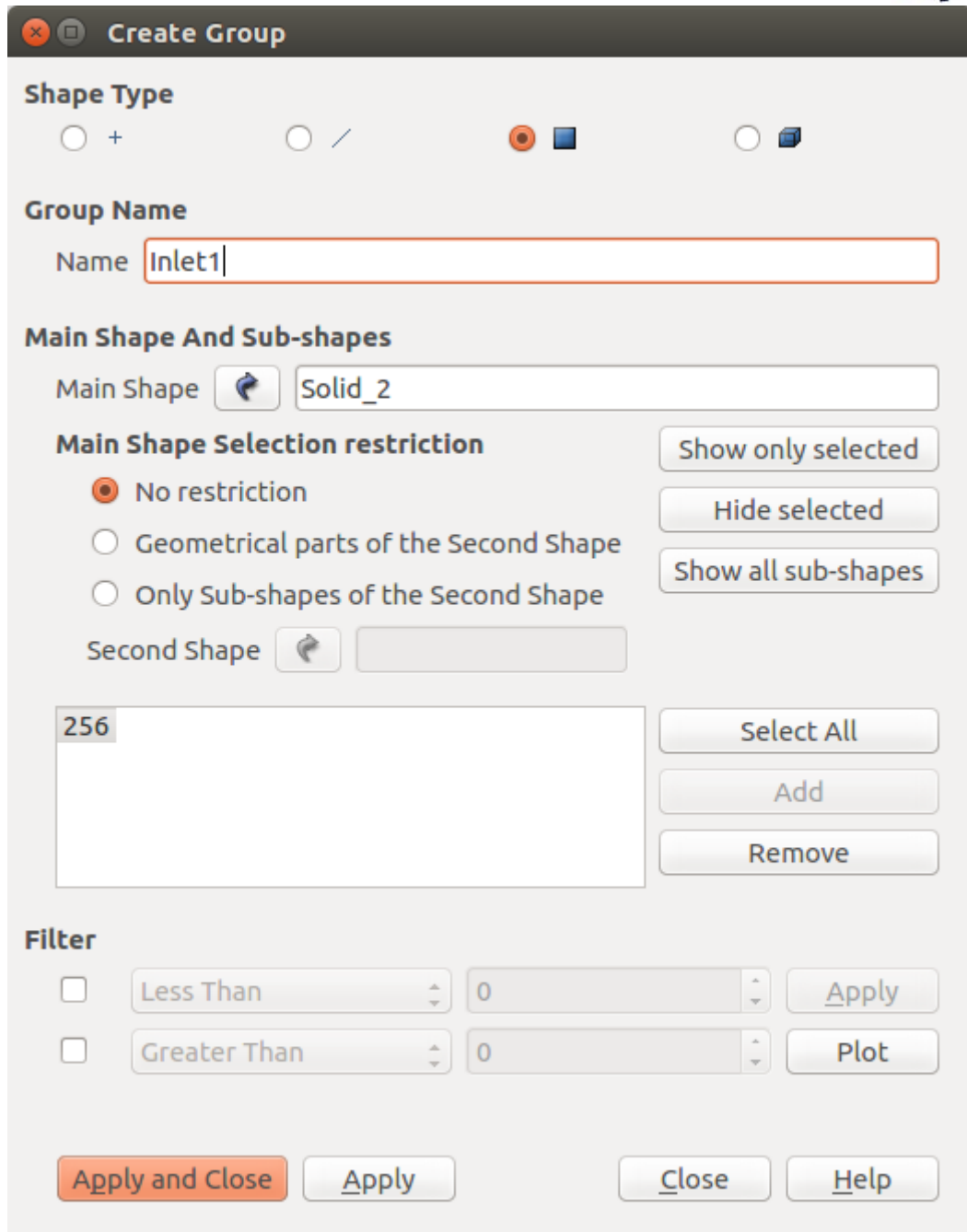


Ilustración 52C Ventana para crear grupos a partir del sólido.



**Create Group**

**Shape Type**

☐ + ☐ / ☒ ☐ ☐

**Group Name**

Name

**Main Shape And Sub-shapes**

Main Shape

**Main Shape Selection restriction**

☒ No restriction

☐ Geometrical parts of the Second Shape

☐ Only Sub-shapes of the Second Shape

Second Shape

**Filter**

☐

☐

Ilustración 53C Creación del grupo inlet1.

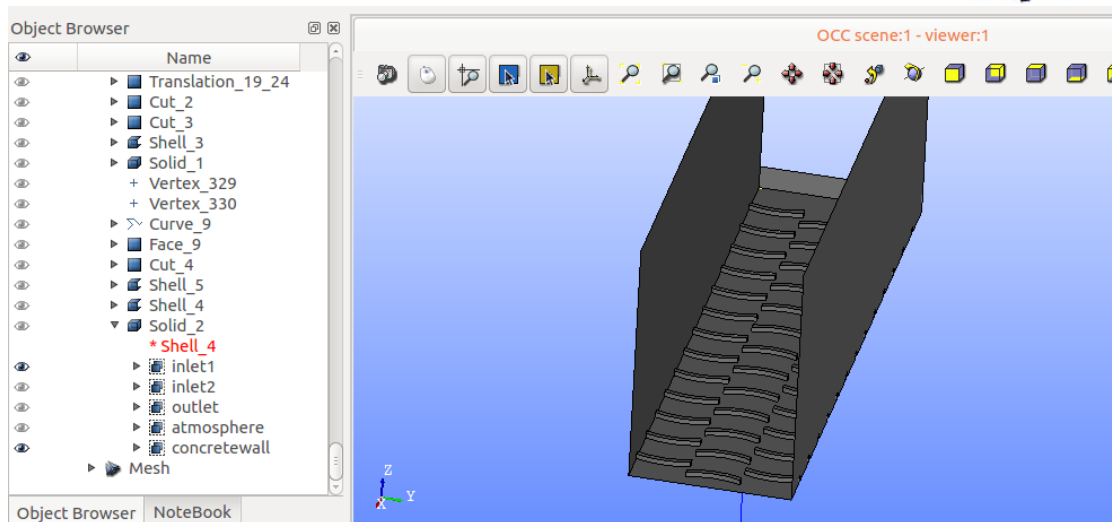


Ilustración 54C Grupo concretewall creado y mostrado en la pantalla.

### Crear la Malla a partir de un Sólido.

1. Luego de crear el sólido se puede crear la malla. En el menú *Module* se elige la opción *Mesh*. Luego se da clic sobre el sólido que se desee transformar en malla, en el menú de inicio se elige *Mesh/Create Mesh*.

La ventana *Create mesh* se despliega y se elige la opción 3D, en algoritmo se elige NETGEN 1D-2D-3D, y en Hypotesis se da clic en la rueda y se elige NETGEN 3D Parameters.

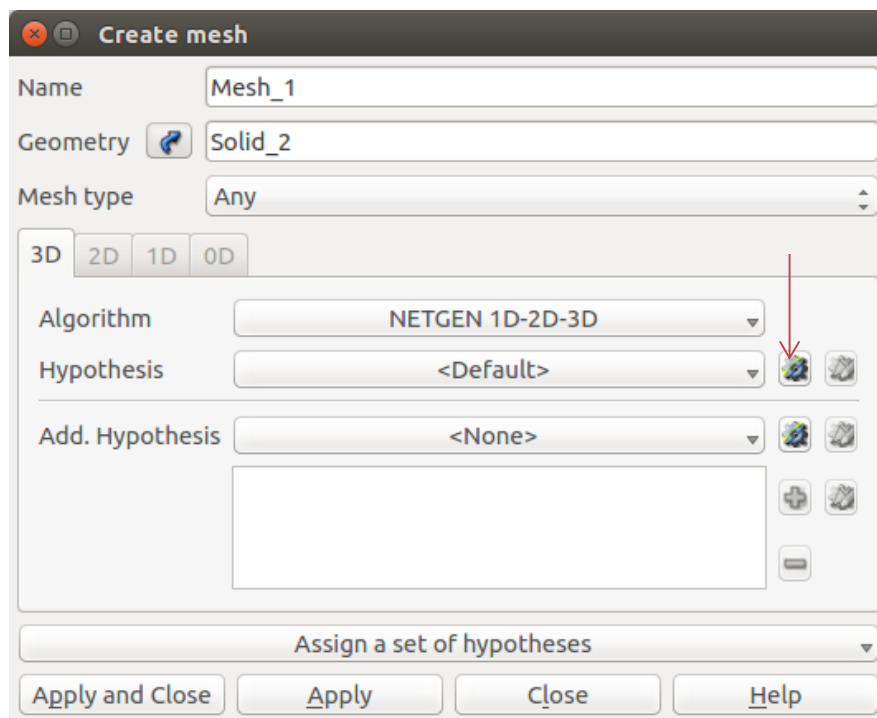


Ilustración 55C Ventana para crear una malla a partir de un sólido.

En la ventana *Hypothesis Construction* se especifica el tamaño máximo y mínimo de las celdas que tendrá la malla. En *Fineness* se elige que tan fino se quiere crear la malla, desde *Very Coarse*, *Coarse*, *Moderate*, *Fine*, *Very Fine*. Todo esto depende de la calidad que se le quiera dar a la malla, se recomienda utilizar la opción *Fine*.

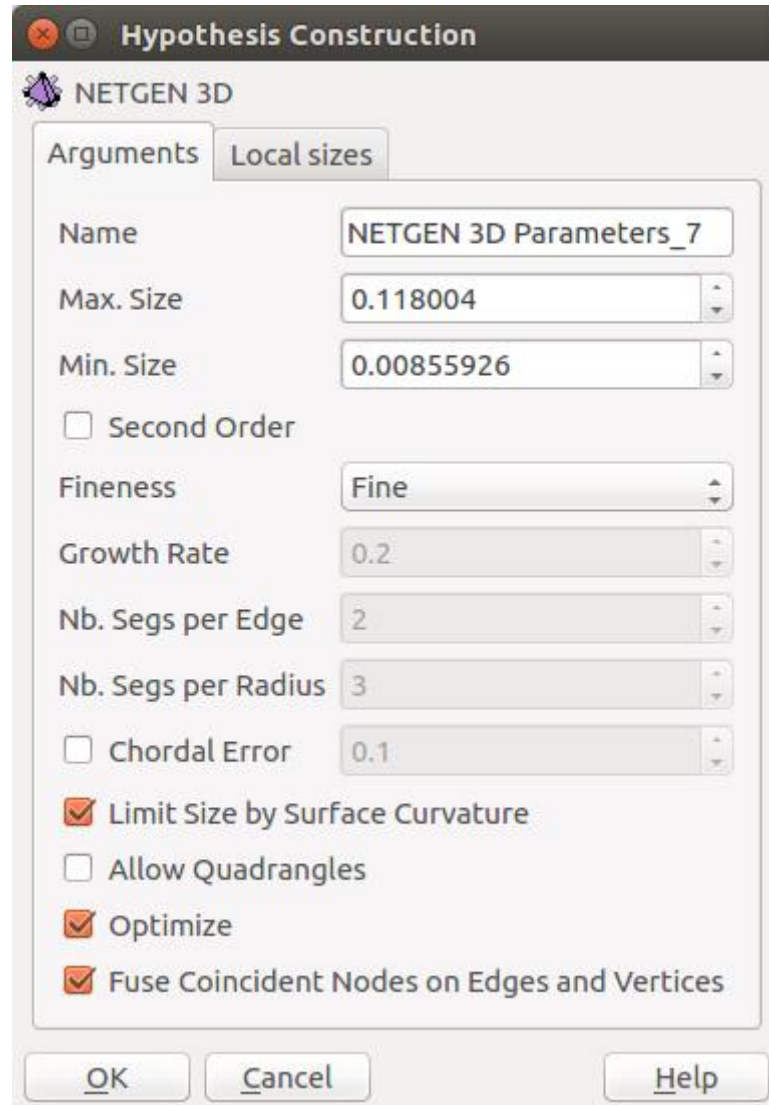


Ilustración 56C Especificaciones del tamaño de las celdas para la malla

Luego se da clic en *OK* y *Apply and Close* y en la ventana izquierda de los elementos se crea la malla. Para que la malla se cree en la ventana gráfica, se le da clic derecho y se elige *Compute*.

Una vez creada la malla se deberán crear los grupos tal y como se realizó con el sólido. Se da clic derecho sobre la malla creada y se elige *Create Group*. Se despliega la ventana *Create Group*, y se elige en *Group Type*, *Group on geometry*, y se elige el grupo de la sección del sólido, se da clic en *Apply* y se crea el siguiente grupo.

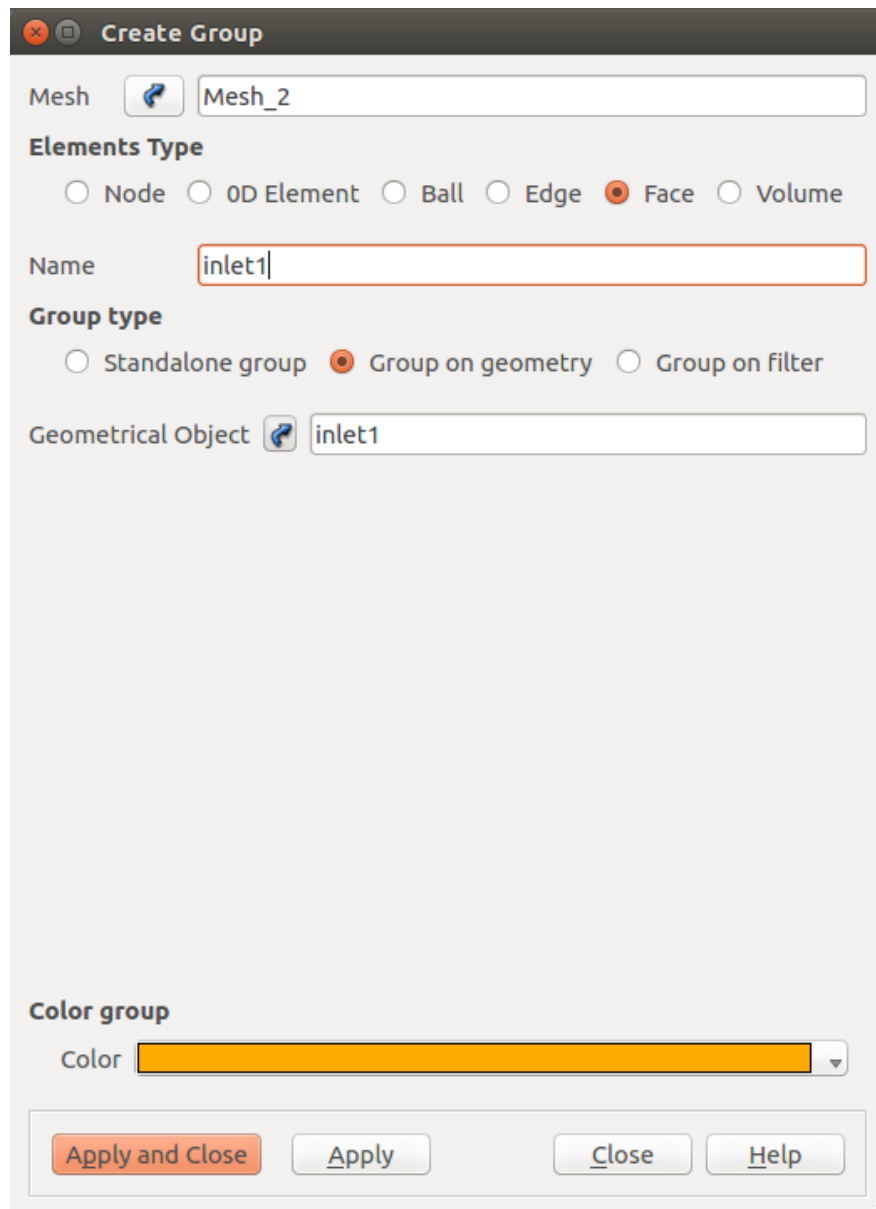


Ilustración 57C Ventana para crear grupos para el mallado a partir de los grupos del sólido.

**Nota:** Se debe asignar el mismo nombre que se asignó al grupo del sólido para el de la malla, caso contrario la malla tendrá errores al ser exportada al programa openFoam.

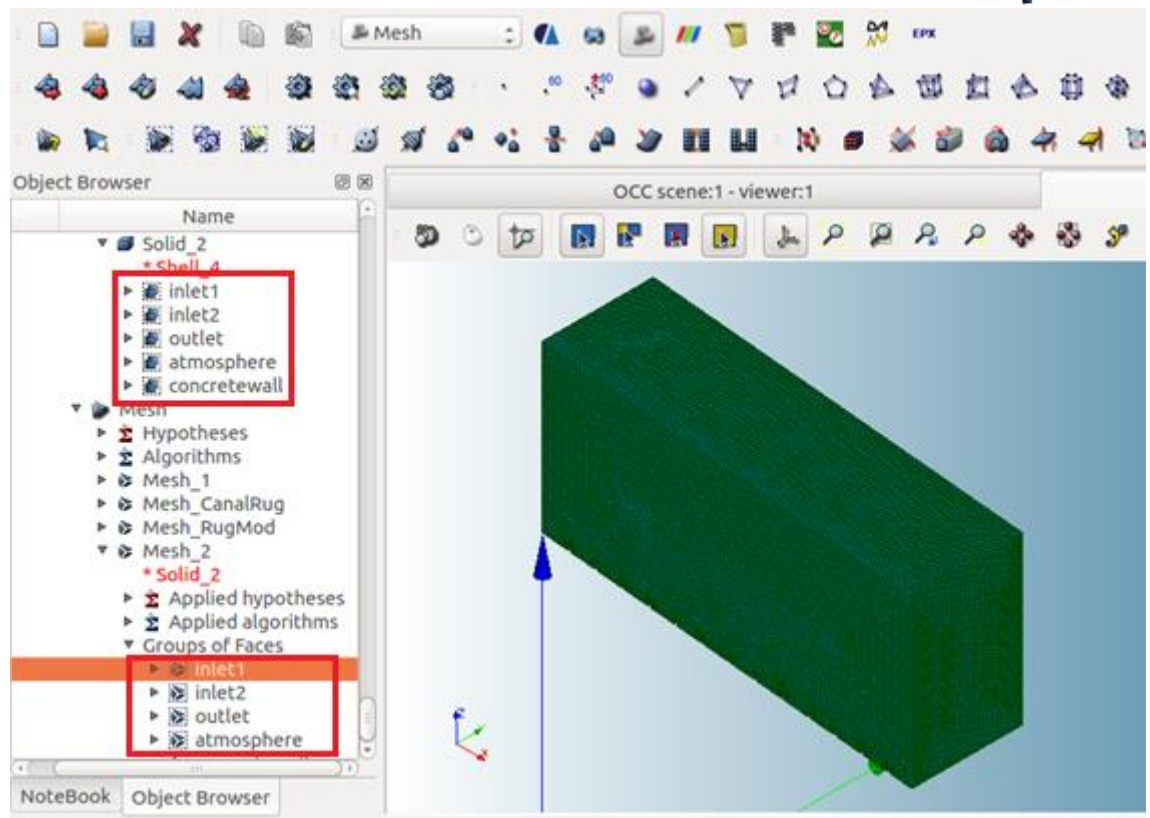


Ilustración 58C Grupos creados en la malla a partir de los grupos del sólido.

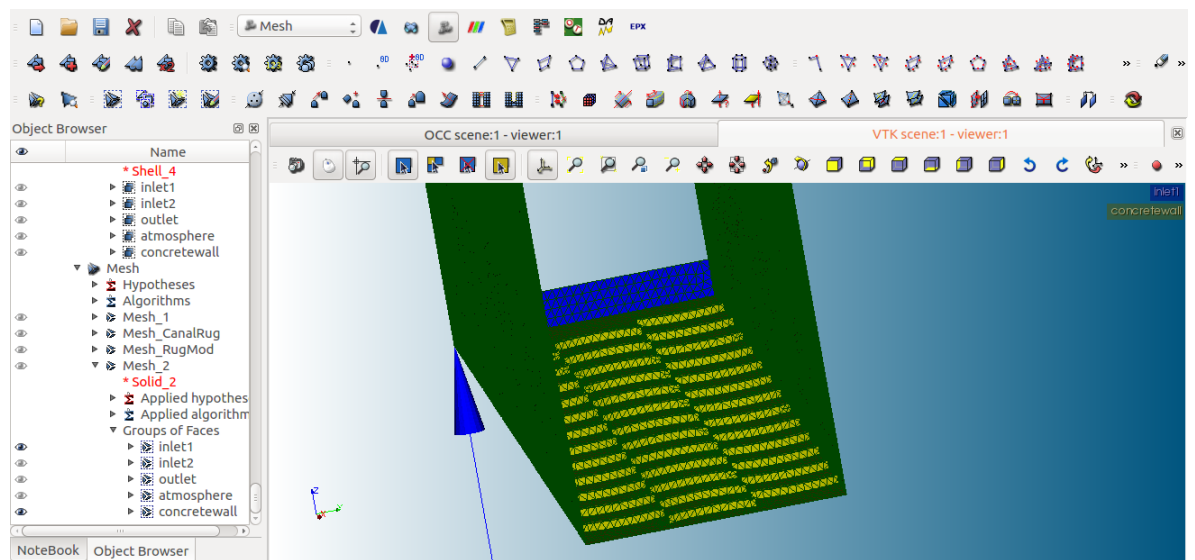
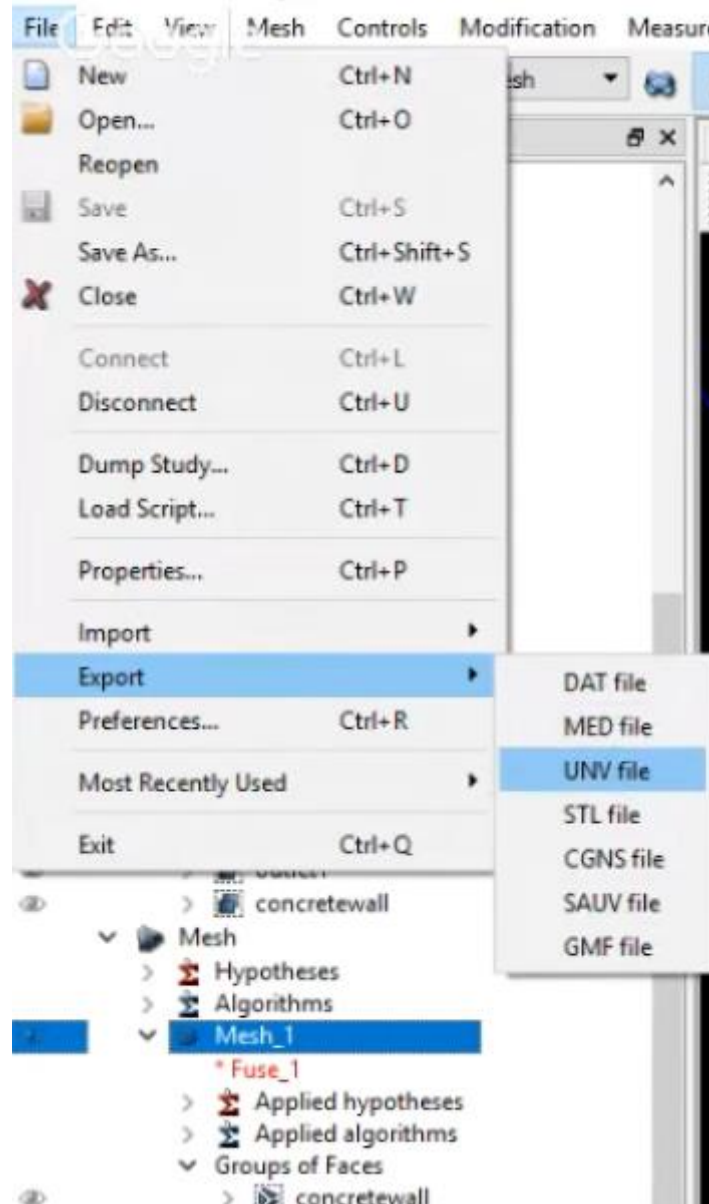


Ilustración 59C Grupo inlet1 y concretewall mostrados en pantalla.

Finalmente para exportar la malla a un formato compatible con openFoam, se señala la malla creada (tener precaución de no señalar los grupos creados), se da clic en el menú inicio *File*, *Export*, *UNV file*, y se guarda la malla en el directorio en donde se encuentra el proyecto de openFoam.



*Ilustración 60C Exportar la malla a un formato compatible con openFoam.*

**Fuente:** Gidahatari (2017) <https://www.youtube.com/watch?v= Ws7OioGCDU>

Para una guía con mayor detalle acerca de la creación de una malla puede referirse a cualquier tutorial en Youtube.